


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE PETRÓLEO

WILLIAM MONTE VERDE

**Estudo Experimental de Bombas de BCS
Operando com Escoamento Bifásico Gás-Líquido**

CAMPINAS
2011

Este exemplar corresponde à redação final
da dissertação defendida por **William
Monte Verde** pela Comissão julgadora em
21/12/2011.



Orientador

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Estudo Experimental de Bombas de BCS Operando com Escoamento Bifásico Gás-Líquido

Autor: William Monte Verde

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart

Curso: Ciências e Engenharia de Petróleo

Área de Concentração: Exploração

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à Comissão de Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo da Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo.

Campinas, 2011
SP – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M764e

Monte Verde, William

Estudo experimental de bombas de BCS operando com escoamento bifásico gás-líquido / William Monte Verde. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Antonio Carlos Bannwart.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Bombas centrífugas. 2. Engenharia de petróleo. 3. Escoamento bifásico. 4. Gás. 5. Escoamento instável (Dinâmica dos fluídos). I. Bannwart, Antonio Carlos. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Experimental investigation of two-phase gas-liquid flow performance of electrical submersible pump

Palavras-chave em Inglês: Centrifugal pumps, Petroleum engineering, Two-phase flow, Gas, Unstable flow (fluid dynamics)

Área de concentração: Exploração

Titulação: Mestre em Engenharia de Petróleo

Banca examinadora: Ricardo Augusto Mazza, Valdir Estevam

Data da defesa: 21-12-2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE PETRÓLEO

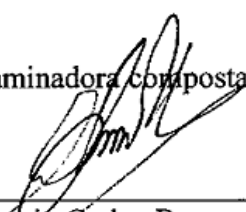
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Estudo Experimental de Bombas de BCS Operando com Escoamento Bifásico Gás-Líquido

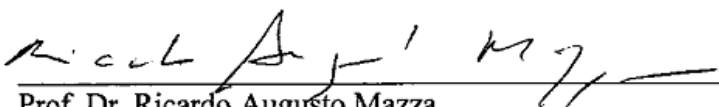
Autor: William Monte Verde

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart

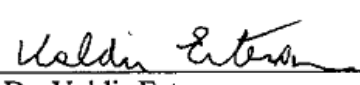
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart, Presidente
DEP/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza
DE/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Valdir Estevam
CENPES/PETROBRAS

Campinas, 21 de Dezembro de 2011.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mais que amada família, em especial aos meus pais Mauro e Márcia.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser concluído sem a colaboração de diversas pessoas, às quais presto minha homenagem:

À minha família pelo carinho e apoio irrestrito a todas as minhas decisões.

Ao meu orientador Antonio Carlos Bannwart, pela oportunidade e apoio durante todas as etapas deste trabalho.

Aos amigos do DEP que muito contribuíram na minha formação e tornaram esse mestrado não apenas um momento de aprendizado e sim um momento de cultivar amigos que serão levados por toda vida, Jorge, Gustavo, Carol, Beto, Felipe, Leandro, Matheus.

À todos do LABPETRO que muito contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, não apenas na parte técnica, mas também pelas horas descontraídas de trabalho em um ambiente muito sadio, Natache, Vanessa, Leandro e Matheus.

À Petrobras pelo apoio ao projeto, em específico ao Dr. Valdir Estevam.

Aos funcionários do CEPETRO, DEP e FEM.

A todos integrantes da república onde vive todo esse período, Felipe, Tiago, Eduardo e Fábio.

“O insucesso é apenas uma oportunidade para começar novamente com mais inteligência e redobrada vontade”...

Henry Ford

RESUMO

A utilização de bombas centrífugas submersas (BCS) operando com a mistura gás-líquido é comum na indústria de petróleo. Para elevadas vazões de líquido e baixas frações de gás o desempenho da bomba é similar ao escoamento monofásico. No entanto, uma degradação severa no desempenho é observada para elevadas frações de gás. A presença de gás livre no escoamento causa instabilidades na curva de ganho de pressão versus vazão. A curva passa a exibir um ponto de máximo, conhecido como ponto de ‘*surging*’, sendo que para vazões abaixo desse ponto, ocorre uma acentuada queda no ganho de pressão e, portanto, na capacidade de bombeamento. O aumento da vazão de gás pode causar o bloqueio da área disponível ao escoamento no rotor da bomba, fazendo com que a vazão seja nula, fenômeno conhecido como ‘*gas locking*’. Portanto, o conhecimento das condições operacionais onde ocorre o *surging* é de fundamental importância para a operação adequada da bomba. O objetivo deste trabalho é obter as curvas de desempenho (elevação, potência e rendimento) de BCS operando com misturas gás-líquido. Com esse propósito as curvas características de um protótipo de BCS foram determinadas utilizando a mistura água-ar, com frações volumétricas de gás entre 0 e 10% em diferentes rotações, pressões de sucção e vazões de líquido. O protótipo de BCS foi desenvolvido a partir de uma bomba convencional permitindo a visualização do escoamento no interior da bomba. Um manuseador de gás também foi testado buscando determinar suas características operacionais. Os ensaios foram realizados em uma bancada de testes, onde foram medidas os parâmetros do escoamento (vazões de ar e água, pressão e temperatura na entrada e saída da bomba) e parâmetros mecânicos (torque de velocidade de rotação). Uma severa degradação no desempenho, e consequentemente no rendimento da bomba foram observados devido à presença de gás no escoamento. Os fenômenos de *surging* e *gas locking* também foram observados durante os testes. A velocidade de rotação e a pressão de sucção influenciaram a fração volumétrica onde o *surging* ocorre. O aumento da velocidade de rotação e da pressão de sucção desloca a fração volumétrica crítica de gás para valores mais elevados, aumentando a faixa operacional da bomba.

Palavras-Chave: Bomba centrífuga submersa, Elevação artificial, Engenharia de petróleo, *surging*, manuseador de gás, Curva de desempenho.

ABSTRACT

The use of electrical submersible pumps (ESP) under gas-liquid flow is very common in the oil industry. At constant liquid flow rate a dramatic degradation on pump head is observed as gas flow rate increases. Natural instabilities of two-phase flow may cause the centrifugal pump to surge at rather low gas void fraction (GVF), as evidenced by a critical point in the pressure gain x flow rate curve, a phenomenon referenced as ‘surging point’. Further increase in GVF may cause the gas to fill most of the pump impeller, making the liquid flow rate to decrease down to zero, a phenomenon known as ‘gas locking’. Therefore, knowledge of the conditions for which the pump starts to surge is of utmost importance and can only be understood through experimental investigation. The goal of this work is to present the experimental ESP performance curves (head, brake horsepower and efficiency) when operating with gas-liquid mixtures. For that purpose the characteristic curves were determined for one prototype of ESP, operating with water and two-phase air-water mixtures with GVF ranging from 0 to 10 % at different rotational speed, intake pressure and liquid flow rate. The ESP prototype is designed to make possible the flow visualization inside the pump. The performance of a gas handler was also tested in order to determine their operational characteristics. Tests were carried out on an ESP testing bench, where flow parameters (air and water flow rates, pressure and temperature at the inlet and outlet of the pump) and mechanical parameters (shaft torque and speed) were measured. A significant decrease in pump head, and consequently in pump efficiency, was observed as the air fraction was increased. Phenomena like surging and gas locking were observed during these tests. The rotational speed and intake pressure affect the critical GVF at the surging conditions. Increasing the rotational speed and intake pressure moves de critical GVF to higher values extending the operational range the ESP.

Key Words: Electrical submersible pump, Artificial lift, Petroleum engineering, Surging, Gas handler, Pump performance.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE NOMENCLATURAS.....	xx
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Conceitos Básicos	5
2.1.1 Bombas Centrífugas Submersas (BCS).....	5
2.1.2 Desempenho de Bombas Centrífugas.....	8
2.1.3 Similaridade em Bombas Centrífugas.....	13
2.1.4 Conceitos de Escoamentos Bifásicos em Bombas.....	14
2.1.5 Desempenho de BCSs operando com mistura bifásica gás-líquido.....	16
2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.2.1 Escoamento Bifásico em Bombas Centrífugas de BCS	20
2.2.2 Manuseador de gás AGH.....	26
2.2.3 Bombas de BCS operando com fluido viscoso.....	27
2.2.4 Visualização de escoamento bifásico em bombas centrífugas de BCS.....	28
3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	31
3.1 Circuito de Testes de BCSs.....	31
3.2 Instrumentação e Sistema de Aquisição de Dados.....	35
3.2.1 Sistema de injeção de ar.....	37
3.3 BCS GN 7000 e AGH.....	41

3.4	Procedimentos Experimentais.	43
3.4.1	Testes de desempenho para escoamento monofásico com líquido.	44
3.4.2	Testes de desempenho para escoamento bifásico.	45
3.4.3	Testes de desempenho do conjunto GN 7000 + AGH com escoamento bifásico.	46
4	RESULTADOS	47
4.1	Escoamento Monofásico com Água.	47
4.2	Escoamento Bifásico Água-Ar.	58
4.2.1	Efeitos da presença de gás no desempenho da bomba GN 7000.	59
4.2.2	Efeitos da velocidade de rotação no desempenho da bomba GN 7000.	64
4.2.3	Efeitos da pressão de sucção no desempenho da bomba GN 7000.	67
4.2.4	Efeitos da presença de gás no desempenho do manuseador de gás (AGH).	70
4.2.5	Desempenho do conjunto AGH + BCS.	74
5	CONCLUSÕES	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
	APÊNDICE A - Calibração dos Instrumentos	82
	APÊNDICE B - Análise de Incertezas Experimentais.	88
	ANEXO I - Fotos da Montagem Experimental.	96
	ANEXO II - Tabelas dos Resultados Experimentais	101
	ANEXO III - Curvas de Catálogo do Desempenho da BCS GN 7000.	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Instalação típica de BCS (adaptado de Takács, 2009).....	2
Figura 2.1 - Estágio de BCS	6
Figura 2.2 - Estágio de uma BCS radial.	7
Figura 2.3 - Estágio de uma BCS de fluxo misto.	7
Figura 2.4 - Classificação do tipo de rotor de acordo com a rotação específica (adaptado de White, 2008).	8
Figura 2.5 - curva de desempenho de bombas centrífugas e suas perdas.....	10
Figura 2.6 - curva de desempenho de bombas centrífugas e suas perdas.....	11
Figura 2.7 - Curva de desempenho de bombas centrífugas.....	12
Figura 2.8 - Representação esquemática da curva de desempenho de BCSs operando com mistura bifásica gás-líquido.....	17
Figura 2.9 - Sinal da pressão de saída, em função do tempo, no ponto de Surging.	18
Figura 2.10 - Estágio de uma manuseador de gás por recirculação.	20
Figura 2.11 - Comparação entre os modelos de Surging para a mistura ar-água, pressão manométrica de entrada de 50 kPa e rotação de 1800 RPM.	26
Figura 3.1 - Vista geral da montagem do circuito de testes.	31
Figura 3.2 - Esquema do circuito de ensaios de bombas de BCS.	32
Figura 3.3 - Esquema do Skid horizontal de BCSs. 1- sucção da BCS, 2- bomba centrífuga submersa (BCS), 3- descarga da BCS, 4- base, 5- motor elétrico, 6- torquímetro.....	33
Figura 3.4 - Módulos de aquisição de sinais	37
Figura 3.5 - Interface gráfica do sistema de aquisição de dados.	38
Figura 3.6 - Esquema da medição de vazão de ar.	39
Figura 3.7 - Injetores de gás. (a) Vista do bocal com oito injetores; (b) Vista frontal do bocal injetor; (c) Detalhe de um injetor.	40

Figura 3.8 - Bomba GN 7000 original: (a) vista geral da bomba; (b) bomba desmontada destacando seus três estágios.	42
Figura 3.9 - Modificações na carcaça do difusor.	42
Figura 3.10 - Bomba modificada: (a) substituição da carcaça externa por um tubo acrílico; (b) bomba com modificações prontas.	43
Figura 3.11 - Manuseador de gás com janela de visualização na sucção.	43
Figura 4.1 - Ensaios de repetitividade para a curva de desempenho bomba GN 7000 operando com três estágios e rotação de 1800 rpm.	48
Figura 4.2 - Ensaios de repetitividade para a curva de potencia consumida da bomba GN 7000 operando com três estágios e rotação de 1800 rpm.	48
Figura 4.3 - Ensaios de repetitividade para a curva de eficiência da bomba GN 7000 operando com três estágios e rotação de 1800 rpm.	49
Figura 4.4 - Comparação entre o desempenho medido do protótipo, fabricante e Amaral (2007).	50
Figura 4.5 - Testes de similaridade aplicada a bomba GN 7000: coeficiente de carga para a bomba operando com água nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm.	51
Figura 4.6 - Testes de similaridade aplicada a bomba GN 7000: coeficiente de potência para a bomba operando com água nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm.	51
Figura 4.7 - Teste de similaridade aplicada a bomba GN 7000: eficiência para a bomba operando com água nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm.	52
Figura 4.8 - Testes de similaridade aplicada ao AGH: coeficiente de carga para o manuseador de gás operando com água nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm.	53
Figura 4.9 - Testes de similaridade aplicada ao AGH: coeficiente de potência para o manuseador de gás operando com água nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm.	53
Figura 4.10 - Testes de similaridade aplicada ao AGH: eficiência para o manuseador de gás operando com água nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm.	54

Figura 4.11 - Comparação entre AGH e GN 7000: coeficiente de carga versus coeficiente de vazão para a operação com água em diferentes velocidades de rotação.	55
Figura 4.12 - Comparação entre AGH e GN 7000: coeficiente de potência versus coeficiente de vazão para a operação com água em diferentes velocidades de rotação.	55
Figura 4.13 - Comparação entre AGH e GN 7000: eficiência versus coeficiente de vazão para a operação com água em diferentes velocidades de rotação.	56
Figura 4.14 - Teste de desempenho do conjunto AGH + GN 7000 operando em série com água e rotação de 1200 rpm.	57
Figura 4.15 - Teste de desempenho do conjunto AGH + GN 7000 operando em série com água e rotação de 1800 rpm.	57
Figura 4.16 - Incremento de pressão gerado pela bomba GN 7000 operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 2400 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.....	59
Figura 4.17 - Potência consumida pela bomba GN 7000 operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 2400 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.....	60
Figura 4.18 - Eficiência da bomba GN 7000 operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 2400 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.	61
Figura 4.19 - Incremento de pressão gerado pela bomba GN 7000 operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 1800 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.....	62
Figura 4.20 - Potência consumida pela bomba GN 7000 operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 1800 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.....	62
Figura 4.21 - Eficiência da bomba GN 7000 operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 1800 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.	63

Figura 4.22 - Incremento de pressão gerado pela bomba GN 7000 operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 1800 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.....	63
Figura 4.23 - Incremento de pressão no ponto de surging para pressão de entrada de 50 kPa e rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm.....	65
Figura 4.24 - Vazão no ponto de surging para pressão de entrada de 50 kPa e rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm.....	65
Figura 4.25 - Efeito da rotação: BCS GN 7000 operando com a mistura água-ar nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e fração volumétrica de gás de 6%.	66
Figura 4.26 - Efeito da rotação: BCS GN 7000 operando com a mistura água-ar nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e fração volumétrica de gás de 10%.	66
Figura 4.27 - Efeito da pressão no desempenho da bomba GN 7000 operando a 1800 rpm e 6% de fração volumétrica de gás.....	67
Figura 4.28 - Efeito da pressão no desempenho da bomba GN 7000 operando a 1800 rpm e 10% de fração volumétrica de gás.....	68
Figura 4.29 - Imagens do escoamento bifásico água-ar na entrada da bomba GN 7000: (a) 1800 rpm e 1% de ar; (b) 1200 rpm e 1% de ar; (c) 900 rpm e 0,25% de ar e (d) 600 rpm e 0,25% de ar.....	69
Figura 4.30 - Incremento de pressão gerado pela bomba AGH operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 2400 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-20%.....	70
Figura 4.31 - Potência consumida pela AGH operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 2400 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-20%.	71
Figura 4.32 - Eficiência do AGH operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 2400 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-20%.....	71

Figura 4.33 - Incremento de pressão gerado pela bomba AGH operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 1800 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.....	72
Figura 4.34 - Potência consumida pela AGH operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 1800 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.	72
Figura 4.35 - Eficiência do AGH operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 1800 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.....	73
Figura 4.36 - Efeito da pressão no desempenho AGH operando a 1800 rpm e 10% de fração volumétrica de gás.	74
Figura 4.37 - Desempenho do conjunto AGH + GN 7000, operando a 1800 rpm, pressão de sucção de 50 kPa, e frações de gás de 6 e 10%.	75
Figura 4.38 - Desempenho do conjunto AGH + GN 7000, operando a 1800 rpm, pressão de sucção de 100 kPa, e frações de gás de 6 e 10%.	76
Figura 4.39 - Desempenho do conjunto AGH + GN 7000, operando a 1800 rpm, pressão de sucção de 200 kPa, e frações de gás de 6 e 10%.	76
Figura. A.1 - Curva de calibração do transdutor de Pressão p_e	83
Figura. A.2 - Curva de calibração do transdutor de Pressão p_s	84
Figura. A.3 - Curva de calibração do transdutor de Pressão p_{gh}	84
Figura. A.4 - Curva de calibração do transdutor de Pressão p_{dif}	85
Figura. A.5 - Curva de calibração do transdutor de Pressão p_{LFE}	85
Figura. A.6 - Curva de calibração do sensor de temperatura T_e	86
Figura. A.7 - Curva de calibração do sensor de temperatura T_s	86
Figura. A.8 - Curva de calibração do torquímetro T_{eixo}	87

Figura: I.1 - Bomba <i>booster</i> (externa).....	96
Figura: I.2 - Bomba GN 7000 instalada no <i>skid</i> de testes.	96
Figura: I.3 - Conjunto AGH e BCS instalados no <i>skid</i> de testes.	97
Figura: I.4 – Medidores de vazão de gás	97
Figura: I.5 - Detalhe do injetor de gás.	98
Figura: I.6 - Bocal injetor de gás.	98
Figura: I.7 - Tanque de armazenamento de água.....	99
Figura: I.8 - Trocador de calor casco-tubo e bomba de calor.....	99
Figura: I.9 - Inversores de frequência.....	100
Figura: I.10 - Medidor de vazão mássico.	100
Figura: III.1 - Curvas de catálogo do desempenho da BCS REDA GN -7000, 3 estágios e frequência de 30 Hz.....	129
Figura: III.2 - Curvas de catálogo do desempenho da BCS REDA GN -7000, 3 estágios e frequência de 40 Hz.....	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Correlações para o Surging em bombas de BCS.....	25
Tabela 3.1 - Equipamentos utilizados na montagem do circuito de testes de BCSs.	34
Tabela 3.2 - Variáveis medidas no sistema de aquisição de dados.	35
Tabela 3.3 - Instrumentação utilizada.....	36
Tabela 3.4 - Características geométricas dos rotores.	41
Tabela 3.5 - Características geométricas dos difusores.	41
Tabela. B.1 - Precisão dos Instrumentos de medição segundo fabricante.....	94
Tabela. B.2 - Incertezas para os experimentos monofásicos.....	95
Tabela. B.3 - Incertezas para os experimentos bifásicos.....	95
Tabela: II.1 - Ensaio de desempenho, bomba GN 7000, 1200 rpm, monofásico.....	101
Tabela: II.2 - Ensaio de desempenho, bomba GN 7000, 1800 rpm, monofásico (repetição #1).	102
Tabela: II.3 - Ensaio de desempenho, bomba GN 7000, 1800 rpm, monofásico (repetição #2).	103
Tabela: II.4 - Ensaio de desempenho, bomba GN 7000, 1800 rpm, monofásico (repetição #3).	104
Tabela: II.5 - Ensaio de desempenho, bomba GN 7000, 1800 rpm, monofásico (repetição #4).	105
Tabela: II.6 - Ensaio de desempenho, bomba GN 7000, 1800 rpm, monofásico (repetição #5).	106
Tabela: II.7 - Ensaio de desempenho, bomba GN 7000, 2400 rpm, monofásico.....	107
Tabela: II.8 - Ensaio de desempenho, AGH 1200 rpm, monofásico.....	108
Tabela: II.9 - Ensaio de desempenho, AGH 1800 rpm, monofásico.....	109
Tabela: II.10 - Ensaio de desempenho, AGH, 2400 rpm, monofásico.....	110
Tabela: II.11 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1200 rpm, $\lambda=2\%$, $p_e=50$ kPa.	111
Tabela: II.12 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1200 rpm, $\lambda=4\%$, $p_e=50$ kPa.	111

Tabela: II.13 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1200 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=50$ kPa.	112
Tabela: II.14 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1200 rpm, $\lambda=8\%$, $p_e=50$ kPa.	112
Tabela: II.15 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1200 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=50$ kPa.	113
Tabela: II.16 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=2\%$, $p_e=50$ kPa.	113
Tabela: II.17 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=4\%$, $p_e=50$ kPa.	114
Tabela: II.18 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=50$ kPa.	115
Tabela: II.19 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=8\%$, $p_e=50$ kPa.	116
Tabela: II.20 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=50$ kPa.	117
Tabela: II.21 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 2400 rpm, $\lambda=2\%$, $p_e=50$ kPa.	117
Tabela: II.22 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 2400 rpm, $\lambda=4\%$, $p_e=50$ kPa.	118
Tabela: II.23 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 2400 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=50$ kPa.	118
Tabela: II.24 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 2400 rpm, $\lambda=8\%$, $p_e=50$ kPa.	119
Tabela: II.25 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 2400 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=50$ kPa.	119
Tabela: II.26 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=100$ kPa.	120
Tabela: II.27 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=200$ kPa.	120
Tabela: II.28 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=100$ kPa.	121
Tabela: II.29 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=200$ kPa.	121
Tabela: II.30 - Ensaio de desempenho, AGH, 1800 rpm, $\lambda=2\%$, $p_e=50$ kPa.	121
Tabela: II.31 - Ensaio de desempenho, AGH, 1800 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=50$ kPa.	122
Tabela: II.32 - Ensaio de desempenho, AGH, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=50$ kPa.	122
Tabela: II.33 - Ensaio de desempenho, AGH, 2400 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=50$ kPa.	123
Tabela: II.34 - Ensaio de desempenho, AGH, 2400 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=50$ kPa.	123
Tabela: II.35 - Ensaio de desempenho, AGH, 2400 rpm, $\lambda=20\%$, $p_e=50$ kPa.	124

Tabela: II.36 - Ensaio de desempenho, AGH, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=300$ kPa.	124
Tabela: II.37 - Ensaio de desempenho, AGH, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=200$ kPa.	124
Tabela: II.38 - Ensaio de desempenho, AGH, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=100$ kPa.	125
Tabela: II.39 - Ensaio de desempenho, AGH+GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=50$ kPa.	125
Tabela: II.40 - Ensaio de desempenho, AGH+GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=50$ kPa.	126
Tabela: II.41 - Ensaio de desempenho, AGH+GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=100$ kPa.	126
Tabela: II.42 - Ensaio de desempenho, AGH+GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=100$ kPa.	127
Tabela: II.43 - Ensaio de desempenho, AGH+GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=200$ kPa.	127
Tabela: II.44 - Ensaio de desempenho, AGH+GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=200$ kPa.	128

LISTA DE NOMENCLATURAS

Letras Latinas

g	Gravidade	[m/s ²]
H	Elevação ou altura de carga	[m.c.a.]
N_E	Velocidade específica	[-]
n_E	Velocidade específica dimensional	[rpm. gpm ^{1/2} .ft ^{-3/4}]
q	Vazão volumétrica total	[m ³ /s]
q_L	Vazão volumétrica de líquido	[m ³ /s]
q_G	Vazão volumétrica de gás	[m ³ /s]
$q_{G,LFE}$	Vazão volumétrica de gás no medidor de vazão	[m ³ /s]
q_n	Vazão total normalizada	[-]
q_{max}	Vazão máxima	[m ³ /s]
p_{gh}	Pressão manométrica de entrada do AGH	[Pa]
p_e	Pressão manométrica de entrada	[Pa]
p_s	Pressão manométrica de saída	[Pa]
Δp_{max}	Variação de pressão máxima	[Pa]
Δp_n	Variação de pressão normalizada	[-]
P_m	Potência mecânica	[W]
$P_{m,max}$	Potência mecânica máxima	[W]
$P_{m,n}$	Potência mecânica normalizada	[-]
P_h	Potência hidráulica	[W]
T_{eixo}	Torque	[N.m]

T_e	Temperatura de entrada	[°C]
T_s	Temperatura de saída	[°C]
D	Diâmetro externo do rotor	[m]
H^*	Coeficiente de carga	[-]
q_L^*	Coeficiente de vazão	[-]
P^*	Coeficiente de carga	[-]
W_L	Vazão mássica de líquido	[kg/s]
R_{GL}	Razão gás-líquido	[-]
V_L	Volume ocupado pela fase líquida	[m ³]
V_G	Volume ocupado pela fase gasosa	[m ³]
V	Volume ocupado pela mistura	[m ³]
L_{tubo}	Comprimento do elemento laminar de fluxo	[m]
D_{tubo}	Diâmetro do microcanal do elemento laminar de fluxo	[m]
q_{tubo}	Vazão mássica de ar através de um microcanal	[m ³ /s]
$p_{e,abs}$	Pressão absoluta na entrada da bomba	[Pa]
$T_{e,abs}$	Temperatura absoluta na entrada da bomba	[K]
R_{ar}	Constante do ar	[J/kg.K]
p_{atm}	Pressão atmosférica	[Pa]
U	Tensão de alimentação do motor	[V]
I	Corrente elétrica	[A]

Letras Gregas

ω	Velocidade de rotação	[rpm]
η	Eficiência	[-]
η_{max}	Eficiência máxima	[-]
η_n	Eficiência normalizada	[-]
η_{motor}	Eficiência do motor elétrico	[-]
λ	Fração volumétrica de gás	[-]
α	Fração de Vazio	[-]
ρ_G	Massa específica do gás	[kg/m ³]
ρ_L	Massa específica do líquido	[kg/m ³]
$\rho_{G,LFE}$	Massa específica do gás no medidor de vazão	[kg/m ³]
Δ	Variação	[-]
μ	Viscosidade absoluta	[Pa.s]
v_L	Velocidade do líquido	[m/s]
v_G	Velocidade do gás	[m/s]
v_S	Velocidade de escorregamento	[m/s]
$\cos \varphi$	Fator de Potência	[-]
ϕ_{Turpin}	Parâmetro de Turpin	[-]

Abreviações

AGH	<i>Advanced gas handler</i>
BCS	Bomba centrífuga submersa ou bombeio centrífugo submerso
BEP	<i>Best efficiency point</i>
BHP	<i>Brake Horsepower</i>
LFE	<i>Laminar flow element</i>
RTD	<i>Resistance temperature detector</i>
RGO	Razão gás óleo

1 INTRODUÇÃO

Os métodos de elevação artificial são fundamentais na indústria do petróleo, sendo utilizados para iniciar ou aumentar a produção de poços cuja energia do reservatório é insuficiente para elevar os fluidos até a superfície. Existem diversos métodos de elevação artificial disponíveis. A escolha do método de elevação mais adequado para determinado poço ou campo de petróleo é função de vários fatores, tais como vazão, profundidade, custo operacional, características do fluido produzido, tipo de completação, entre outros.

O bombeio centrífugo submerso (BCS) é um método de elevação artificial amplamente utilizado e consiste na utilização de uma bomba centrífuga de múltiplos estágios, geralmente instalada na extremidade da coluna de produção, dentro do poço de petróleo (Figura 1.1). O acionamento da unidade de bombeamento é feito usando um motor elétrico que fica submerso no fluido produzido. A energia elétrica necessária ao funcionamento do motor é conduzida por cabo elétrico da superfície até o fundo do poço. O motor é conectado ao protetor que proporciona a operação segura da unidade de bombeamento. A admissão da bomba ou o separador de gás são posicionados acima do protetor, permitindo que o fluido entre na bomba, e ao mesmo tempo, que uma pequena quantidade de gás livre seja removida. A bomba complementa a energia do reservatório, aumentando a pressão, de modo a superar as perdas de carga até as facilidades de produção.

Devido à depleção do reservatório de petróleo, é comum a pressão diminuir abaixo do ponto de bolha (pressão de saturação). Nesses níveis de pressão o fluido produzido é uma mistura bifásica gás-líquido. As mudanças nas propriedades e composição do fluido produzido, tais como variação da densidade, viscosidade ou presença de uma fase gasosa podem causar severos impactos no desempenho das bombas de BCS

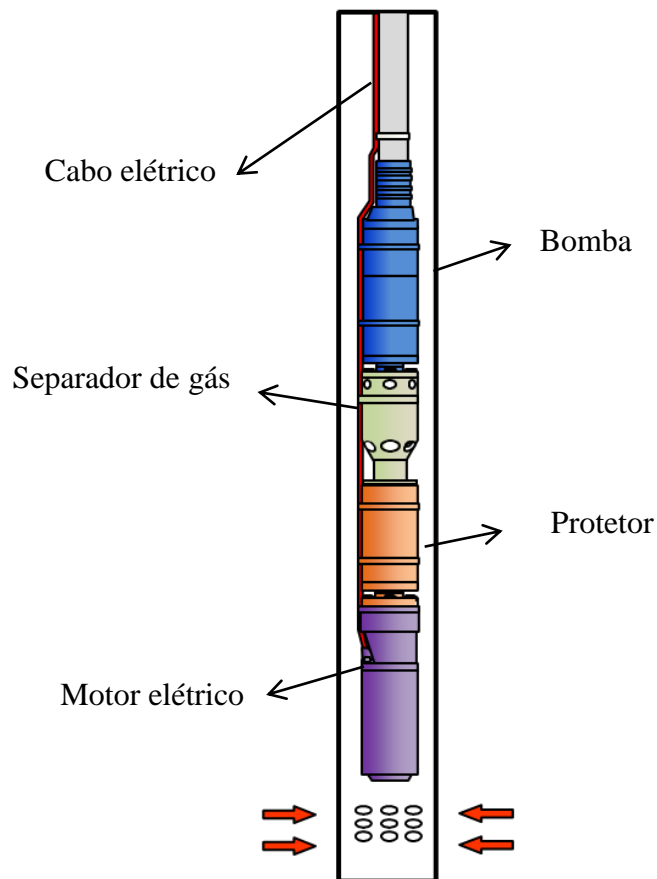


Figura 1.1 - Instalação típica de BCS

Para elevadas vazões de líquido e baixas frações de gás o desempenho da bomba é similar ao escoamento monofásico. No entanto, uma degradação severa no desempenho é observada para elevadas frações de gás. A presença de gás livre no escoamento causa instabilidades na curva de ganho de pressão versus vazão. A curva passa a exibir um ponto de máximo, conhecido como ponto de '*surging*', sendo que para vazões abaixo desse ponto, ocorre uma acentuada queda no ganho de pressão e, portanto, na capacidade de bombeamento. Após o ponto de *surging*, um aumento da fração de gás pode causar o bloqueio da área disponível ao escoamento no rotor da bomba, fazendo com que a vazão seja nula, fenômeno conhecido como '*gas locking*'.

A utilização de BCS operando com escoamento gás-líquido é comum na indústria do petróleo. Por isso existe um grande interesse em conhecer o desempenho dessas bombas de forma a operá-las fora do ponto de *surging*, onde os danos causados pela presença de gás são menores.

Portanto, o conhecimento das condições operacionais e quais os fatores que influenciam o início das instabilidades no desempenho da bomba são de grande importância.

Existem algumas técnicas para evitar que o gás chegue à sucção da BCS, tais como a separação natural das fases no anular do poço e a utilização de separadores rotativos de fundo. Se nenhuma dessas técnicas é eficiente ou por algum motivo sua utilização não é recomendada, o gás inevitavelmente chegará a BCS. Nesses casos a bomba deve ser capaz de bombear essa mistura gás-líquido, seja por modificações de projeto ou pela utilização de equipamentos especiais. O manuseador de gás é um desses equipamentos especiais e visa aumentar a quantidade de gás com que a bomba pode operar, eliminando o problema de *surging* e *gas locking*. O conhecimento do desempenho desse equipamento e em quais condições operacionais eles são eficientes também é de fundamental importância pra a indústria.

Devido à complexidade do escoamento bifásico gás-líquido no interior de bombas centrífugas, a maioria das pesquisas na indústria do petróleo são de natureza empírica. Os diferentes trabalhos realizados até agora têm sido fundamentais para compreender o comportamento e fornecer informações sobre o desempenho real de bombas de BCS operando com misturas bifásicas. No entanto, os modelos mecanicistas disponíveis na literatura para prever o fenômeno de *surging* ainda possuem comportamentos muito distintos entre si, motivando novos estudos na área.

Portanto, os objetivos deste trabalho são:

- Determinar o desempenho de bombas de BCS operando com escoamento bifásico gás-líquido em diferentes condições operacionais de rotação.
- Identificar a ocorrência dos fenômenos de *surging* e *gas locking* em função das condições operacionais.
- Visualizar e identificar os padrões de escoamento na entrada da bomba;
- Medir a eficiência e verificar as características de operação de um manuseador de gás por recirculação (*Gas Handler*).

O restante da dissertação é organizado em mais quatro capítulos. O Capítulo 2 apresenta os conceitos e definições abordados sobre bombas de BCS e escoamento multifásico. É realizada também uma revisão bibliográfica sobre bombas de BCS operando com a mistura gás-líquido e a

visualização desse tipo de escoamento. O Capítulo 3 descreve a montagem experimental, os equipamentos testados e os procedimentos adotados. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e suas análises. O Capítulo 5 resume as conclusões sobre o trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é dividido em duas seções. Primeiro, são apresentados os conceitos básicos, teorias e definições sobre bombas centrífugas e escoamento bifásico. Na segunda seção é apresentada uma ampla revisão bibliográfica sobre BCSs, abordando seu desempenho operando com escoamento bifásico e a visualização desse tipo de escoamento.

2.1 Conceitos Básicos

2.1.1 Bombas Centrífugas Submersas (BCS).

Bombas são máquinas hidráulicas que realizam trabalho sobre um fluido com a finalidade de transportá-lo de um ponto a outro. Quanto ao princípio de funcionamento, esses dispositivos podem ser classificados em: deslocamento positivo ou dinâmico. As bombas de BCS são do segundo tipo, operam segundo o princípio dinâmico, onde todas as interações de trabalho resultam de efeitos dinâmicos do rotor sobre a corrente de fluido. A BCS é acionada por um motor elétrico, fornece energia cinética ao fluido que então é convertida parcialmente em energia de pressão.

As principais características de BCS são:

- bombas de múltiplos estágios com algumas dezenas ou centenas de estágios instalados em série,
- os rotores são do tipo fechado,
- possuem apenas uma sucção,
- os rotores são de fluxo misto ou radial.

Cada estágio de uma BCS é composto por dois componentes básicos: rotor e difusor. O rotor é constituído por um conjunto de pás confinadas por paredes (*Shrouds*), tanto no lado de entrada quanto do lado de saída do rotor. Esse tipo de rotor é classificado como fechado, onde as

pás e paredes formam os canais do rotor. O difusor é o componente fixo, solidário à carcaça da bomba.

A Figura 2.1 ilustra um estágio típico de BCS. O fluido vindo de um estágio anterior entra no rotor na direção axial com velocidade relativamente baixa. Devido a elevada velocidade de rotação do rotor, o fluido é acelerado e tem sua velocidade aumentada. Assim, o torque aplicado pela bomba ao fluido é convertido em energia cinética. O fluido a alta velocidade deixa o rotor e entra no difusor, parte estacionária da bomba, onde ocorre a conversão de parte da energia cinética em energia de pressão. Ao deixar o difusor o fluido possui maior pressão quando comparado à entrada do rotor, portanto a passagem do fluido pelo estágio aumenta sua pressão. Uma vez que os estágios são montados em série, e o processo de ganho de pressão se repete e a pressão do fluido vai aumentando estágio após estágio.

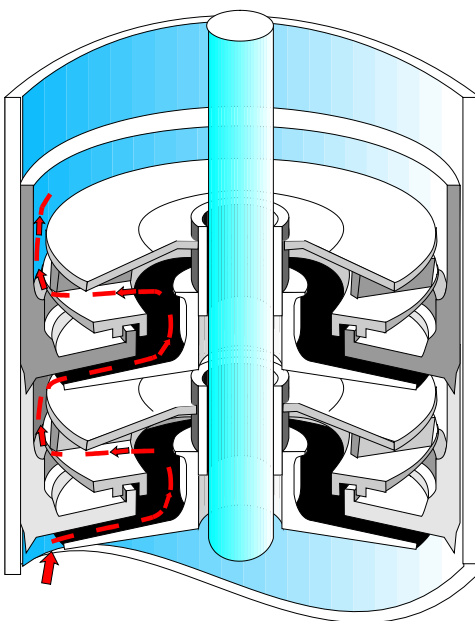


Figura 2.1 - Estágios de BCS

As bombas centrífugas podem ser classificadas, também, de acordo com a direção que o fluido deixa o rotor. Dessa forma, são classificadas como radial, axial ou misto. As bombas de BCS são geralmente do tipo radial ou misto, de acordo com a vazão de produção desejada. Geralmente, bombas com rotores radiais são usadas para baixas vazões de produção, até $640 \text{ m}^3/\text{d}$

(4000 bpd), já as bombas de fluxo misto são utilizadas quando maiores vazões de produção são requeridas. As Figuras 2.2 e 2.3 ilustram rotores do tipo radial e fluxo misto, respectivamente.

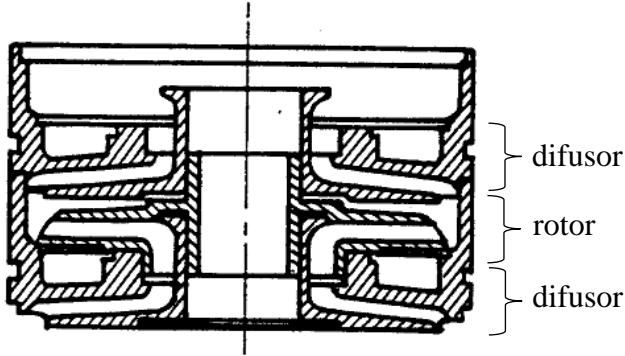


Figura 2.2 - Estágio de uma BCS radial.

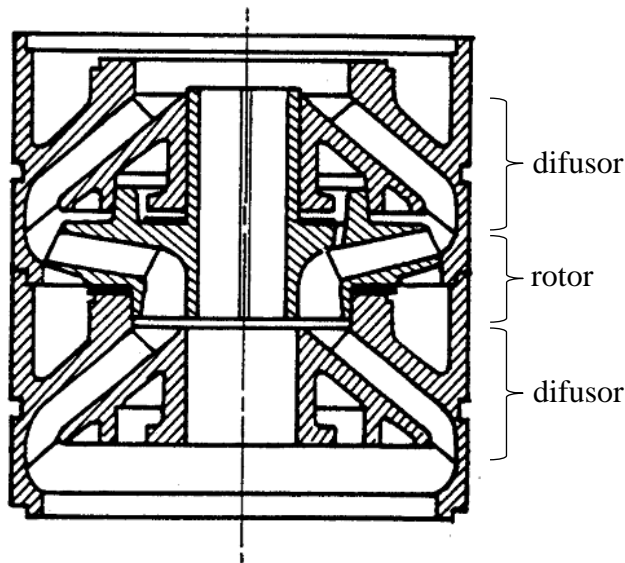


Figura 2.3 - Estágio de uma BCS de fluxo misto.

O conceito de velocidade específica é utilizado para comparar bombas centrífugas de diferentes geometrias. A velocidade específica pode ser definida como a rotação necessária para produzir uma altura de carga unitária a uma taxa volumétrica unitária, sendo um número adimensional que é definido no ponto de melhor eficiência da bomba por:

$$N_E = \frac{\omega q_L^{1/2}}{g^{3/4} H^{3/4}} \quad (2.1)$$

onde ω é a velocidade de rotação, q_L é vazão volumétrica de líquido, g é a gravidade e H é altura de carga da bomba.

Embora a velocidade específica seja um parâmetro adimensional, é prática comum utilizar uma equação na forma da Equação 2.2, onde ω é expresso em rpm, q_L em gpm e H em ft. Quando isto é feito, a velocidade específica não é mais um parâmetro adimensional e sua magnitude depende das unidades utilizadas no seu cálculo.

$$n_E = \frac{\omega q_L^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (2.2)$$

A velocidade específica é característica da geometria do rotor. Rotores radiais possuem valores baixos de velocidade específica e rotores axiais possuem elevados valores de velocidade específica. Rotores de fluxo misto apresentam velocidade específica intermediária entre rotores radiais e axiais, conforme mostrado na Figura 2.4.

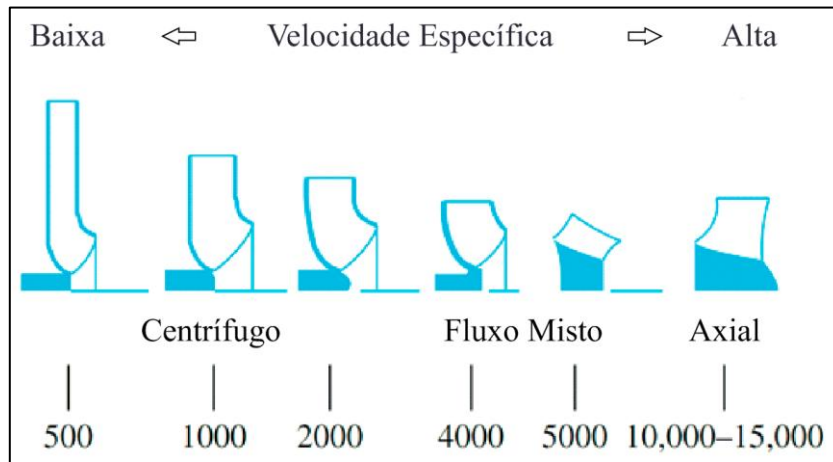


Figura 2.4 - Classificação do tipo de rotor de acordo com a rotação específica (adaptado de White, 2008).

2.1.2 Desempenho de Bombas Centrífugas.

Conforme descrito anteriormente, bombas centrífugas são máquinas hidráulicas que convertem a energia mecânica vindo do motor elétrico em energia cinética do fluido bombeado. A energia cinética é proporcional ao termo ρv^2 , onde ρ é massa específica do fluido e v a velocidade. Dessa forma, uma bomba operando a rotação constante e consequentemente com

velocidade do fluido constante, transfere quantidades distintas de energia cinética para fluidos de diferentes massas específicas. Como a energia cinética é convertida em energia de pressão, quanto maior a massa específica do fluido bombeado, maior o diferencial de pressão gerado pela bomba. Uma forma conveniente de expressar o desempenho de bombas centrífugas é a altura de carga, definida pela Equação 2.3.

$$H = \frac{\Delta p}{\rho g} \quad (2.3)$$

onde Δp é o incremento de pressão através da bomba, ρ é a massa específica do fluido e g a aceleração da gravidade.

A altura de carga ou elevação é constante para fluidos de diferente massa específica e dessa forma, é utilizada para o dimensionamento e especificação de bombas centrífugas.

Considerando que o rotor tenha um número infinito de pás e sendo desprezíveis as diversas perdas, a aplicação do princípio da quantidade de movimento angular em um volume de controle finito, fornece a equação de Euler para bombas centrífugas. Essa equação calcula de forma idealizada a altura de carga gerada pela bomba. No entanto, o número finito de pás cria regiões de recirculação dentro dos canais do rotor, modificando a distribuição de velocidade e degradando a altura de carga dada pela equação de Euler.

Além da recirculação nos canais do rotor devido ao número finito de pás, outras perdas são responsáveis pela dissipação de energia, tais como:

- perdas hidráulicas: são perdas devido a dissipação viscosa do escoamento do fluido nos canais do rotor e difusor, assim como a dissipação viscosa na parte posterior do rotor, o chamado atrito de disco. Como esse tipo de escoamento é geralmente turbulento, as perdas hidráulicas são proporcionais ao quadrado da vazão.

- perdas por choque: em condições de operação fora do BEP, ponto de melhor eficiência, o fluido não incide tangencialmente nas pás da entrada do rotor. Assim, ocorrem perturbações no escoamento, descolamento da camada limite e criação de regiões de recirculação.

- perdas por vazamento: ocorre devido às folgas existentes entre as partes móveis e fixas da bomba. A perda por vazamento reduz a altura de carga produzida pela bomba, que é representativa em baixas vazões.

Considerando todas as perdas descritas acima, o desempenho real de uma bomba centrífuga é dado pela curva H x Q, representada esquematicamente na Figura 2.5.

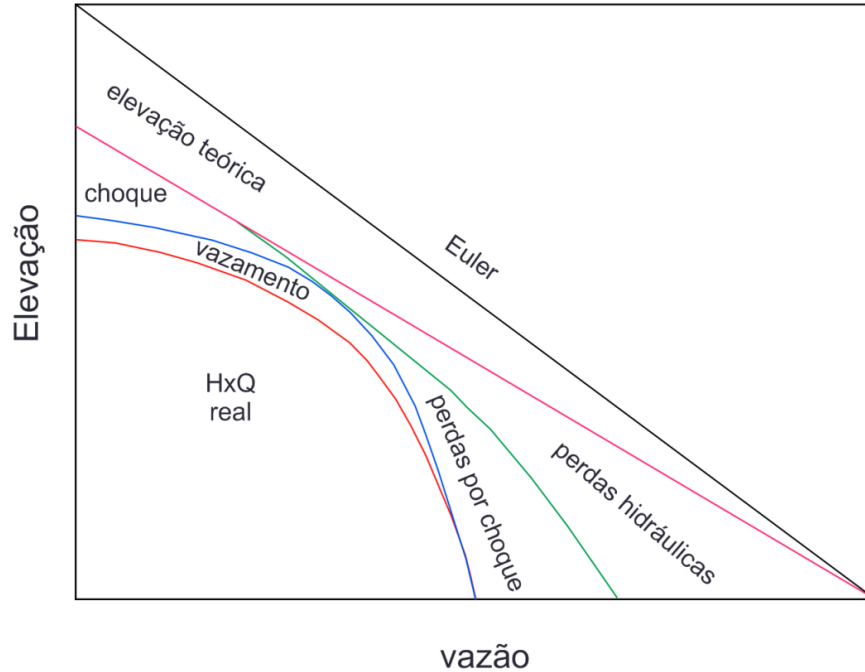


Figura 2.5 - curva de desempenho de bombas centrífugas e suas perdas.

A potência requerida para o funcionamento da bomba é denominada potência mecânica ou BHP (*brake horsepower*) e representa um parâmetro fundamental no dimensionamento do motor elétrico que irá acionar a bomba. A potência mecânica pode ser calculada através de parâmetros elétricos tais como corrente (I), tensão (U), e características do motor tais como rendimento (η_{motor}) e fator de potência ($\cos \varphi$), conforme mostrado na Equação 2.4.

$$P_m = \sqrt{3} U I (\cos \varphi) \eta_{motor} \quad (2.4)$$

sendo os parâmetros elétricos do motor função da rotação e da carga do aplicada ao motor.

Outra metodologia de cálculo é através do torque (T_{eixo}) aplicado ao eixo de acionamento da bomba, conforme mostrado na Equação 2.5.

$$P_m = \omega T_{eixo} \quad (2.5)$$

Em aplicações práticas o monitoramento da potência mecânica é realizado através dos parâmetros elétricos. Esse método possui uma incerteza maior em relação à utilização do torque, pois envolve um número maior de variáveis de elevada incerteza. Em testes de desempenho realizados em laboratório o método do torque é mais utilizado por ser mais exato.

Devido às perdas de energia que ocorrem durante o funcionamento das bombas, apenas uma parcela da potência mecânica é transferida ao fluido. A Figura 2.6 ilustra de forma esquemática diversos tipos de perdas que consomem potência.

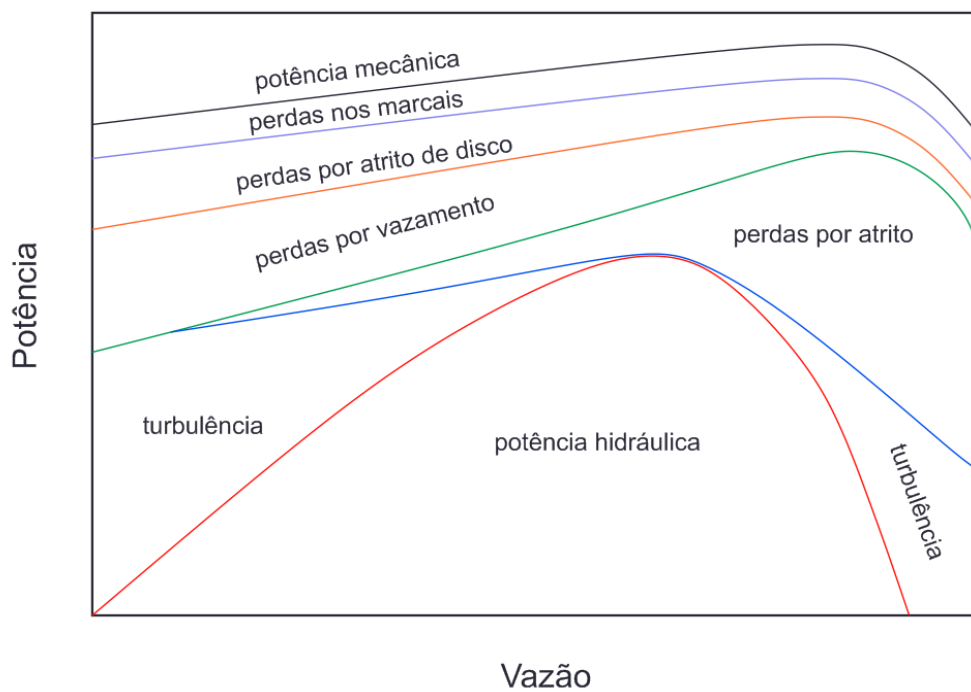


Figura 2.6 - curva de desempenho de bombas centrífugas e suas perdas.

A potência efetivamente entregue ao fluido ao ser bombeado é a potência hidráulica, definida como o produto da vazão volumétrica pelo diferencial de pressão da bomba, conforme Equação 2.6.

$$P_h = \Delta p \, q \quad (2.6)$$

A eficiência da operação de bombas centrífugas é definida com a razão entre potência hidráulica e a potência mecânica, Equação 2.7. A curva de eficiência versus vazão, Figura 2.7, possui um ponto de máximo, denominado ponto de melhor eficiência (BEP). As condições operacionais ideais para a operação de bombas centrífugas são em torno do BEP.

$$\eta = \frac{P_h}{P_m} = \frac{\Delta p \, q}{\omega \, T_{eixo}} \quad (2.7)$$

A Figura 2.7 ilustra, também, as curvas de desempenho fornecidas pelo fabricante, sendo utilizadas no dimensionamento das unidades de bombeio. A bomba é selecionada conforme a altura de carga e vazão requerida, de modo que opere o mais próximo possível do BEP. O dimensionamento do motor elétrico é realizado através da curva de potência mecânica apresentada nas curvas de desempenho.

Conforme recomendações API RP 11S2, os testes de desempenho devem ser realizados com água a temperatura de 60°F e velocidade de rotação de 3500 rpm. Caso os testes sejam realizados em outras condições operacionais, os resultados devem ser corrigidos para as condições padrões. As bombas podem ser testadas com qualquer número de estágio, no entanto as curvas devem ser apresentadas para um único estágio.

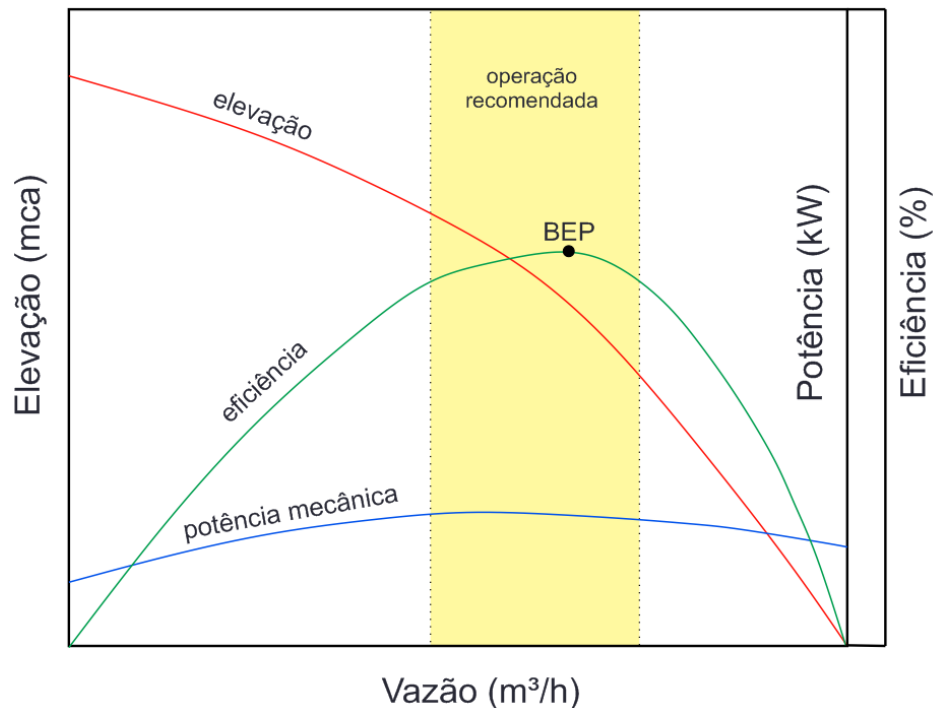


Figura 2.7 - Curva de desempenho de bombas centrífugas.

2.1.3 Similaridade em Bombas Centrífugas.

Para uma determinada bomba, os parâmetros de desempenho de altura de carga e potência mecânica, são dependentes das condições operacionais. As seguintes relações funcionais podem ser escritas:

$$gH = f_1(q_L, D, \omega, \rho, \mu) \quad (2.8)$$

$$P_m = f_2(q_L, D, \omega, \rho, \mu) \quad (2.9)$$

onde D é o diâmetro externo do rotor e μ é a viscosidade absoluta do fluido.

A aplicação do teorema dos Pi de Buckingham mostra que a forma adimensional apropriada é dada por:

$$\frac{gH}{\omega^2 D^2} = g_1\left(\frac{q_L}{\omega D^3}, \frac{\rho \omega D^2}{\mu}\right) \quad (2.10)$$

$$\frac{P_m}{\rho \omega^3 D^5} = g_2\left(\frac{q_L}{\omega D^3}, \frac{\rho \omega D^2}{\mu}\right) \quad (2.11)$$

O termo $\rho \omega D^2 / \mu$ é uma forma do número de Reynolds. Os outros três adimensionais são definidos como:

- Coeficiente de carga:

$$H^* = \frac{gH}{\omega^2 D^2} \quad (2.12)$$

- Coeficiente de vazão:

$$q_L^* = \frac{q_L}{\omega D^3} \quad (2.13)$$

- Coeficiente de potência:

$$P^* = \frac{P_m}{\rho \omega^3 D^5} \quad (2.14)$$

Para a semelhança completa nos testes de desempenho de bombas, seria necessário que os coeficientes de escoamento e número de Reynolds fossem idênticos. A observação experimental mostra que os efeitos viscosos são relativamente sem importância, quando máquinas geometricamente semelhantes operam sob condições semelhantes de escoamento. Assim, das Equações 2.10 e 2.11, quando:

$$\left(\frac{q_L}{\omega D^3}\right)_1 = \left(\frac{q_L}{\omega D^3}\right)_2 \quad (2.15)$$

tem-se que:

$$\left(\frac{gH}{\omega^2 D^2}\right)_1 = \left(\frac{gH}{\omega^2 D^2}\right)_2 \quad (2.16)$$

$$\left(\frac{P_m}{\rho \omega^3 D^5}\right)_1 = \left(\frac{P_m}{\rho \omega^3 D^5}\right)_2 \quad (2.17)$$

As Equações 2.16 e 2.17 são úteis para transpor por escala as características de uma bomba para diferentes condições de operação, quando se varia o diâmetro ou a velocidade.

2.1.4 Conceitos de Escoamentos Bifásicos em Bombas.

A terminologia é sempre um problema a parte em escoamentos multifásicos. Infelizmente, não há consenso quanto ao emprego de símbolos para representar as variáveis desse tipo de escoamento. Neste trabalho serão adotados os conceitos de escoamento bifásico em tubos no estudo das bombas de BCS. A notação adotada segue aproximadamente a empregada por Brill e Mukherjee (1999) e Shoham (2006).

As características do escoamento bifásico são estabelecidas por diferentes parâmetros dimensionais e adimensionais, muitos dos quais serão utilizados no decorrer deste trabalho e cujas definições são apresentadas a seguir.

- Vazão Volumétrica de Gás (q_G): é o volume de gás por unidade de tempo injetado na bomba, medido na temperatura e pressão da sucção. Geralmente, a vazão volumétrica de gás é medida antes da injeção na bomba, em condições diferentes da sucção da bomba, sendo necessário calcular a vazão volumétrica na entrada da bomba. A conservação da massa de gás fornece:

$$q_G = \frac{q_{G,LFE} \cdot \rho_{G,LFE}}{\rho_G} \quad (2.18)$$

onde, ρ_G é a massa específica do gás na sucção da bomba, $\rho_{G,LFE}$ é a massa específica do gás nas condições do medidor de vazão e $q_{G,LFE}$ é a vazão volumétrica de gás no medidor.

- Vazão Volumétrica (q): é a soma da vazão volumétrica de gás, q_G , e a vazão volumétrica de líquido, q_L , ambas medidas a pressão e temperatura da sucção da bomba,

$$q = q_G + q_L \quad (2.19)$$

sendo a vazão volumétrica de líquido a razão entre a vazão mássica (W_L) e a massa específica do líquido (ρ_L) a temperatura e pressão da sucção da bomba.

$$q_L = \frac{W_L}{\rho_L} \quad (2.20)$$

- Velocidade de Escorregamento (v_S): A velocidade da fase líquida, v_L , e a velocidade da fase gasosa, v_G , geralmente são diferentes. A velocidade de escorregamento representa a velocidade relativa entre as duas fases:

$$v_S = v_G - v_L \quad (2.21)$$

- Razão gás-líquido (R_{GL}): é a razão entre a vazão volumétrica de gás e a vazão volumétrica de líquido, ambos medidos no estado termodinâmico da sucção da bomba.

$$R_{GL} = \frac{q_G}{q_L} \quad (2.22)$$

- Fração de Vazio (α): é a fração ocupada em um elemento de volume pela fase gasosa. A fração de vazio é uma variável local e instantânea, calculada a partir da velocidade local das fases. Na prática, utiliza-se a fração de vazio média em uma seção de tubo, calculada pela razão entre o volume ocupado pela fase gasosa, V_G , e o volume ocupado pela mistura, V .

$$\alpha = \frac{V_G}{V} = \frac{V_G}{V_G + V_L} \quad (2.23)$$

Fração Volumétrica de Gás (λ): é a razão entre a vazão volumétrica de gás e a vazão volumétrica total:

$$\lambda = \frac{q_G}{q} = \frac{q_G}{q_G + q_L} \quad (2.24)$$

Por analogia ao escoamento bifásico em tubos, a fração volumétrica de gás está associada à condição de não escorregamento entre as fases, ou seja, quando as velocidades locais das fases são iguais. De modo geral, essa condição é válida para o escoamento de pequenas bolhas dispersas carregadas por uma fase líquida continua que ocorre comumente em escoamentos com elevadas vazões de líquido.

2.1.5 Desempenho de BCSs operando com mistura bifásica gás-líquido.

A utilização de BCSs operando com misturas multifásicas é comum na produção de petróleo. O gás natural livre presente no reservatório ou proveniente da descompressão do óleo é produzido juntamente com o petróleo líquido, provocando um escoamento bifásico gás-líquido.

Bombas centrífugas são máquinas hidráulicas de funcionamento dinâmico, onde a energia cinética transferida ao fluido é proporcional a sua massa específica. Portanto, a presença de gás na sucção da BCS deteriora o aumento de pressão do fluido ao ser bombeado. Além da redução da capacidade de elevação, a operação da bomba na presença de gás é afetada por outros fenômenos. A curva de desempenho de bombas operando com escoamento gás-líquido é mostrada esquematicamente na Figura 2.8.

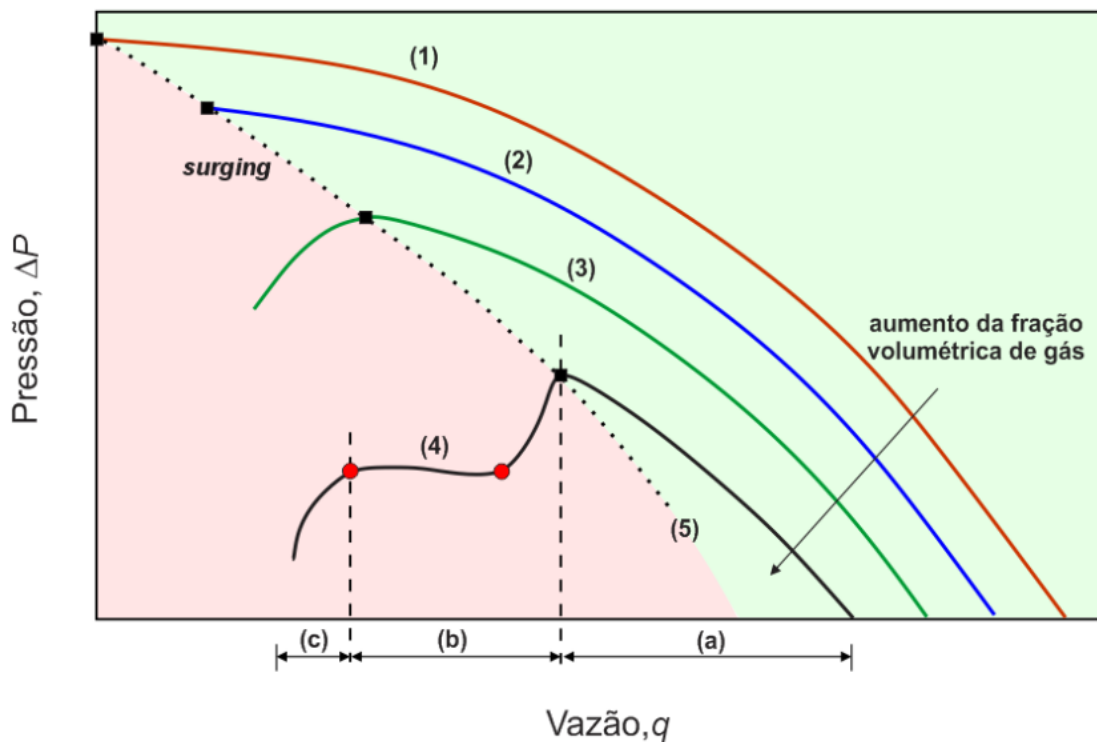


Figura 2.8 - Representação esquemática da curva de desempenho de BCSs operando com mistura bifásica gás-líquido.

A curva (1) representa a operação da bomba apenas com líquido. Na presença de uma pequena quantidade de gás, curva (2), observa-se apenas uma discreta diminuição da capacidade de elevação. Nessas condições as bolhas se encontram dispersas no líquido de forma homogênea.

Com o incremento da fração volumétrica de gás, curva (3), é evidenciado um ponto de máximo na curva de desempenho. A presença de gás livre no escoamento causa instabilidades no sinal de pressão, Figura 2.9. Esse ponto de máximo é conhecido com ponto de ‘*surging*’, caracterizado por uma acentuada diminuição da capacidade de bombeamento. Nessas condições o escoamento não é mais homogêneo. A força gravitacional e o intenso campo centrífugo tende a segregar as fases mais rapidamente do que a turbulência pode misturá-las. Por essas razões, as fases escoam separadamente no interior da bomba. As bolhas de gás coalescem e tende a se acumular no lado de baixa pressão das pás do rotor.

Para uma elevada fração volumétrica, curva (4), observa-se novas instabilidades da curva de operação, representado pelos círculos vermelhos. A curva (4) apresenta três regiões distintas de operação. A região (a) apresenta uma operação estável, não havendo oscilações nas curvas de

desempenho. A região (b) inicia-se no ponto de *surging*, sendo caracterizada por uma queda abrupta na capacidade de bombeamento. Na região (c) destaca-se uma grande instabilidade na operação da bomba. A presença de grande quantidade de gás livre em baixas vazões pode causar o bloqueio da área disponível ao escoamento no rotor da bomba, fazendo com que a vazão seja nula, fenômeno conhecido como '*gas locking*'. Essa é uma região de intermitência, sendo caracterizada por ciclos de bloqueio e presença de escoamento.

A curva tracejada (5) representa a curva de *surging*. A direita da curva de *surging* (região verde) a operação da bomba é estável, no entanto, a esquerda dessa curva (região vermelha) a operação apresenta instabilidades. Portanto, o conhecimento das condições onde ocorre o ponto de *surging* é de extrema importância para a aplicação adequadas das bombas de BCS.

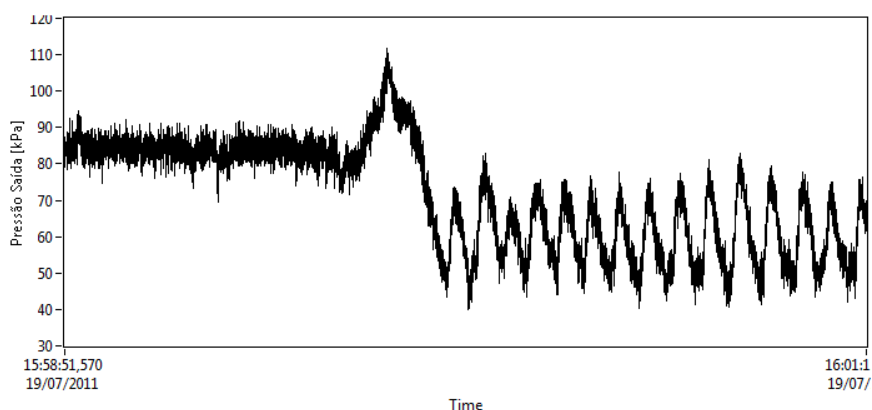


Figura 2.9 - Sinal da pressão de saída, em função do tempo, no ponto de Surging.

Conforme mostrado anteriormente, a degradação do desempenho da bomba assim com a ocorrência dos fenômenos de *surging* e *gas locking* estão associado à segregação entre as fases. Os principais fatores que influenciam na segregação das fases são:

- Geometria do estágio: a capacidade da BCS de operar na presença de uma fase compressível depende de sua velocidade específica. Quanto maior a velocidade específica da bomba, maior sua capacidade de operar na presença de gás. Assim, bombas com rotores radiais de baixa velocidade específica são mais influenciadas pela presença de gás do que bombas de fluxo misto com velocidade específica maior.

- Diâmetro de bolha: a dimensão das bolhas de gás possui grande influência nas forças de arrasto e empuxo que atuam sobre as bolhas dispersas no líquido. As forças de arrasto tende a manter as bolhas escoando imersas no líquido, já as forças de empuxo tende a separar as fases.

Bolhas de diâmetro reduzido escoam juntamente com o líquido, sendo finamente dispersas e difíceis de segregar.

- Massa específica das fases: as forças de empuxo são proporcionais a razão entre a massa específica do líquido e do gás. Quanto mais próxima as massas específicas das fases, menor a força de empuxo e, conseqüentemente, a tendência de segregação entre fases. A pressão de sucção em bombas de BCS é um parâmetro operacional que influencia diretamente a massa específica do gás. Devido à compressibilidade do gás, o aumento da pressão de sucção aumenta a massa específica do gás e contribui para o desempenho da bomba. No entanto, do ponto de vista de produção, o aumento da pressão de sucção diminui a vazão de produção do poço. Portanto, o controle da pressão de sucção nem sempre é uma variável que pode ser controlada para aumentar a tolerância da bomba à presença de gás.

- Rotação: a rotação da bomba tende a aumentar o campo centrífugo no interior do rotor segregando as fases. No entanto, a elevação da rotação aumenta a vazão e conseqüentemente a turbulência. A turbulência gerada diminui o diâmetro das bolhas aumentando sua dispersão na fase líquida.

A produção de poços com elevação razão gás-óleo poderia ser realizada mantendo-se a pressão de sucção da bomba acima da pressão de saturação do óleo. Entretanto, o aumento da pressão no fundo do poço limitaria a vazão de produção. Por essa razão, na maioria dos casos, soluções específicas devem ser adotadas para a produção de poços com elevada RGO quando bombas de BCS são utilizadas como método de elevação artificial.

Em poços onde a produção gás é inevitável e não é possível separá-lo do líquido antes de ser bombeado, são utilizados equipamentos que aumentam a tolerância da bomba à presença de gás. Dentre as soluções empregadas, está o manuseador de gás por recirculação, Figura 2.10.

Esses equipamentos consistem em bombas centrífugas de múltiplos estágios modificadas de forma a promover a recirculação do fluido através dos estágios. A recirculação do fluido promovida pela manuseador de gás tem como objetivo diminuir o diâmetro das bolhas e homogeneizar o escoamento, dificultando a segregação das fases e aumentando a tolerância da bomba a presença de gás.

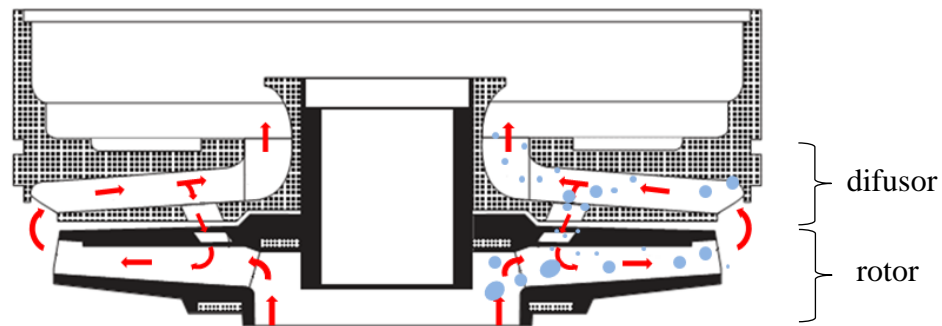


Figura 2.10 - Estágio de uma manuseadora de gás por recirculação.

Conforme ilustrado na Figura 2.10, pequenos orifícios são perfurados na parede superior do rotor e na parede inferior do difusor. Esses orifícios formam caminhos para o fluido escoar do difusor para o rotor anterior. A recirculação do fluido tende a aumentar a turbulência e reduzir o diâmetro das bolhas. A desvantagem desse tipo de equipamento é a redução da eficiência de 20 - 30% ou mais. A redução da eficiência é causada pela dissipação de energia devido à recirculação do fluido.

2.2 Revisão Bibliográfica

2.2.1 Escoamento Bifásico em Bombas Centrífugas de BCS

Lea e Bearden (1980) realizaram o primeiro estudo experimental na indústria do petróleo sobre bombas operando na presença de gás. Os autores obtiveram uma grande quantidade de dados experimentais buscando compreender qualitativamente o desempenho de BCS operando com escoamento gás-líquido. Utilizando a mistura diesel e CO₂ os autores testaram o desempenho de três modelos de bombas centrífugas nas pressões de sucção de 50, 100 e 200 psig. Para a mistura água e ar foram realizados testes a 25 psig de pressão de sucção. Lea e Bearden (1980) observaram a ocorrência de instabilidades na operação da bomba com cerca de 10% de fração volumétrica de ar, os autores se referiram a essa instabilidade de operação como *surging*.

Turpin *et al* (1986) utilizou os dados experimentais de Lea e Bearden (1980) e desenvolveu uma correlação empírica para prever a altura de carga em função da razão gás-líquido na sucção da bomba. De acordo com os autores, o limite de operação estável da bomba pode ser avaliado utilizando o parâmetro ϕ_{Turpin} , sendo:

$$\phi_{Turpin} = \left(\frac{2000}{3p_e} \right) \frac{q_G}{q_L} \quad (2.25)$$

onde q_G é a vazão volumétrica de gás, q_L é a vazão volumétrica de líquido e p_e é a pressão de sucção em psia. A operação estável da bomba é definida para $\phi_{Turpin} < 1$, enquanto os efeitos da presença do gás no desempenho da bomba são mais severos para $\phi_{Turpin} > 1$.

Sachdeva (1989) desenvolveu o primeiro modelo da indústria do petróleo para prever o desempenho de bombas de BCS operando na presença de gás. O autor desenvolveu um modelo bifásico homogêneo, unidimensional, como padrão de escoamento de bolhas dispersas. Esse modelo considera a geometria da bomba, pressão, fração volumétrica na entrada da bomba, geometria da bomba e propriedades dos fluidos. O modelo consiste da aplicação, nos canais do rotor, das equações de conservação de massa e quantidade de movimento para ambas as fases, acompanhada de uma equação de estado para a fase compressível. O autor relata que o *surging* ocorre devido ao intenso campo centrífugo que acelera mais o líquido do que o gás, quando a velocidade do gás é próxima de zero. A comparação do modelo proposto por Sachdeva (1989) com os resultados experimentais de Lea e Bearden (1980) apresenta um erro médio da ordem de 40 a 60%.

Através de resultados experimentais, Dunbar (1989) propôs de forma gráfica que o desempenho de BCSs operando com mistura gás-líquido fosse descrito por duas regiões. A primeira região desse gráfico é representada pelo modelo homogêneo, sendo necessárias correções para o modelo homogêneo na segunda região. O autor descreveu o *surging* como sendo a transição entre as duas regiões. Pessoa (2001) formulou uma correlação, Equação 2.26, que representasse a transição entre as duas regiões do gráfico em função das vazões de líquido, q_L , e gás, q_G , e da pressão de entrada da bomba p_e .

$$p_e = 935 \left(\frac{q_G}{q_L} \right)^{\frac{1}{1,724}} \quad (2.26)$$

Cirilo (1998) avaliou o desempenho de três modelos de BCSs, sendo duas de fluxo misto (GN4000 e GN7000) e uma de fluxo radial (GN 2100). Os testes foram realizados utilizando a mistura água-ar como fluido de trabalho em diferentes condições operacionais de vazão de gás, pressão de entrada e velocidade de rotação. Um dos resultados desse estudo foi uma correlação

que determina a fração de gás máxima que a bomba pode tolerar em uma operação estável. Essa correlação é dada por:

$$\lambda_s = 0,0187p_e^{0,4342} \quad (2.27)$$

onde p_e é a pressão de sucção em psia. Essa correlação é limitada para frações de gás maiores que 15%.

Romero (1999) investigou experimentalmente sistema de bombeamento envolvendo BCSs e manuseadores de gás AGH. O autor propôs mapas de desempenho para cada equipamento e também para a montagem AGH + BCS. Correlações empíricas foram desenvolvidas para calcular a fração volumétrica máxima na sucção da bomba para uma operação estável de cada equipamento operando separadamente e quando colocados em série. Essas correlações representam as transições entre as regiões dos mapas de desempenho. Para a bomba operando sozinha a fração volumétrica crítica é função apenas da pressão de sucção:

$$\lambda_s = 0,004(p_e - 14,7)^{0,6801} \quad (2.28)$$

onde p_e é a pressão de sucção em psia.

Pessoa e Prado (2001) investigaram o desempenho de uma BCS composta por 22 estágios operando com escoamento bifásico água-ar. A bomba foi instrumentada de forma a medir-se o incremento de pressão de cada estágio separadamente. O procedimento experimental adotado consiste em manter-se constante a pressão de sucção (100 psig), rotação (55 Hz) e vazão de gás, enquanto varia-se a vazão de líquido do valor máximo ao mínimo. Os resultados de Pessoa e Prado (2001) mostram que cada estágio da bomba apresenta um desempenho diferente, sendo a contribuição do primeiro estágio no desempenho global da bomba bastante distinto dos demais estágios. Em algumas condições de operação, observou-se que o primeiro estágio representava uma queda de pressão, sendo os demais estágios responsáveis pelo aumento de pressão e os últimos estágios os de melhor desempenho.

Estevam (2002) desenvolveu um dos primeiros protótipos de BCS permitindo a visualização do escoamento no interior do rotor. Partindo das observações experimentais o autor delimitou a ocorrência do *surging* definindo um adimensional chamado de Indicador de Surging (I_{ss}), Equação 2.29. Esse número adimensional, obtido a partir da aplicação do modelo de dois

fluidos, relaciona a força de arrasto e a força centrífuga com a fração de vazio na entrada do rotor. A aplicação do indicador de surging indica qual o padrão de escoamento ocorre nos canais do rotor: bolhas dispersas na entrada ou em todo o canal do impelidor; ou estratificado com região de remistura formada por bolhas dispersas. A ocorrência do surging é relacionada com a estratificação do escoamento no interior do rotor.

$$I_{ss} = C_D \left(\frac{r}{d_b} \right) F_{r\omega} \quad (2.29)$$

onde C_D é o coeficiente de arrasto, r é o raio do impelidor, d_b é o diâmetro de bolha e $F_{r\omega}$ é o número de Froude centrífugo.

Duran e Prado (2003) testaram experimentalmente o desempenho de bombas de BCS operando com a mistura água-ar. Os ensaios foram realizados para diferentes pressões de sucção (50 a 350 psi), vazões de gás (5000 a 90000 scfp) e vazões de líquido (2000 a 6950 scfd), em um total de 1162 pontos experimentais. Observando o desempenho de um estágio em específico, os autores identificaram três padrões de escoamento: bolhas, bolhas alongadas e transição. Duran e Prado (2003) mostram que o modelo homogêneo não representa o desempenho da bomba, especialmente quando ela opera com bolhas alongadas ou na região de transição. Portanto, os autores propuseram correlações para modelar o desempenho da bomba para os diferentes padrões de escoamento. Outras correlações foram desenvolvidas para modelar as regiões de transição entre os padrões de escoamento. O critério de *surging*, que define os limites entre o escoamento de bolhas e o escoamento de transição, é dado pela Equação 2.30.

$$\frac{q_G}{q_{L,max}} = \left(5,58 \frac{\rho_G}{\rho_L} + 0,098 \right) \left(\frac{q_L}{q_{L,max}} \right)^{1,421} \quad (2.30)$$

onde $q_{L,max}$ é a vazão máxima de operação da bomba apenas com líquido.

Zapata (2003) realizou testes similares a Duran e Prado (2003), incluindo o estudo dos efeitos da velocidade de rotação no desempenho da bomba. O autor observou os mesmos padrões de escoamento descritos por Duran e Prado (2003), entretanto destacou que o regime de escoamento de bolhas se estende com o aumento da velocidade de rotação. A correlação proposta por Zapata (2003) é dada pela Equação 2.31.

$$\frac{q_G}{q_{L,max}} = \frac{-0,027 \left(\frac{q_L}{q_{L,max}} \right)}{-0,9001 + \left(\frac{q_L}{q_{L,max}} \right)} \quad (2.31)$$

Gamboa e Prado (2011) realizaram uma ampla revisão bibliográfica sobre os modelos de *surging* disponíveis na literatura. Utilizando dados experimentais de desempenho de uma bomba convencional de BCS composta por 22 estágios, operando com a mistura ar-água, os autores propuseram um modelo semi-empírico que fornece a fração volumétrica crítica de gás em função da velocidade de rotação, propriedades dos fluidos e geometria da bomba.

$$\left(\frac{q_L}{q_{L,max}} \right) = \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0,2} \left(\frac{\Omega D^2}{\nu} \right)^{0,4} \left[0,102 e^{\left(\frac{q_L}{q_{L,max}} \right)} \right]^{4,4682} \quad (2.32)$$

onde Ω é a velocidade de rotação, D é o diâmetro externo do rotor e ν é a viscosidade cinemática do líquido.

A Tabela 2.1 apresenta uma síntese das correlações disponíveis na literatura para modelar o fenômeno de *surging*.

A diferença entre os resultados fornecidos por essas correlações é ilustrada na Figura 2.11, onde a fração volumétrica crítica de gás é mostrada em função da vazão volumétrica normalizada de líquido.

Tabela 2.1 - Correlações para o Surging em bombas de BCS.

Autor	Correlação
Turpin <i>at al.</i> (1986)	$\phi_{Turpin} = \left(\frac{2000}{3p_e}\right) \frac{q_G}{q_L}$
Dunbar (1989) – Pessoa (2001)	$p_e = 935 \left(\frac{q_G}{q_L}\right)^{\frac{1}{1,724}}$
Cirilo (1998)	$\lambda_s = 0,0187 p_e^{0,4342}$
Romero (1999)	$\lambda_s = 0,004(p_e - 14,7)^{0,6801}$
Estevam (2001)	$I_{ss} = C_D \left(\frac{r}{d_b}\right) F_{r\omega}$
Duran e Prado (2003)	$\frac{q_G}{q_{L,max}} = \left(5,58 \frac{\rho_G}{\rho_L} + 0,098\right) \left(\frac{q_L}{q_{L,max}}\right)^{1,421}$
Zapata (2003)	$\frac{q_G}{q_{L,max}} = \frac{-0,027 \left(\frac{q_L}{q_{L,max}}\right)}{-0,9001 + \left(\frac{q_L}{q_{L,max}}\right)}$
Gamboa e Prado (2011)	$\left(\frac{q_L}{q_{L,max}}\right) = \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0,2} \left(\frac{\Omega D^2}{\nu}\right)^{0,4} \left[0,102 e^{\left(\frac{q_L}{q_{L,max}}\right)}\right]^{4,4682}$

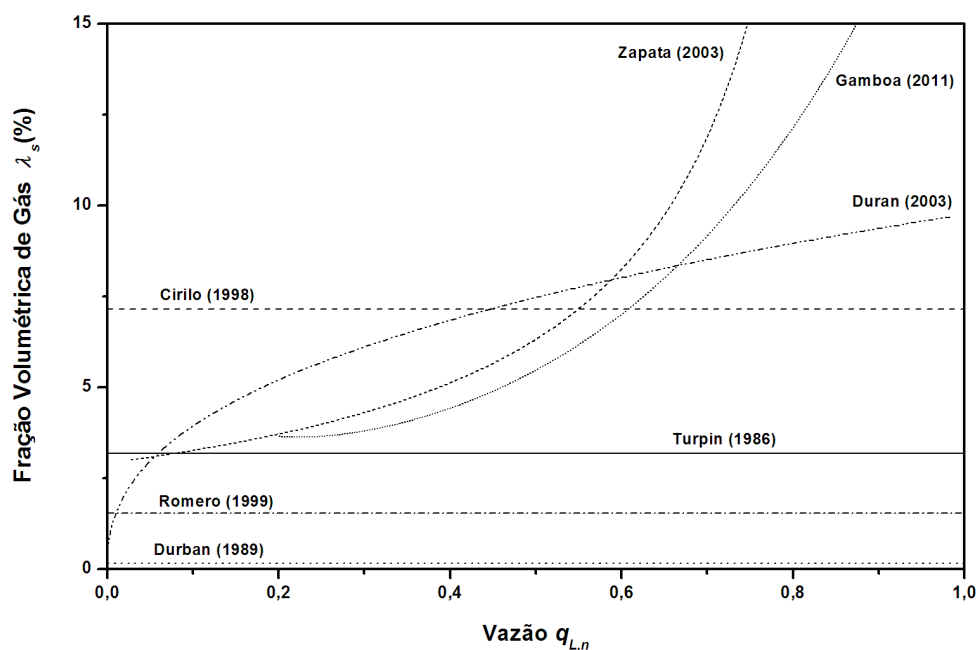


Figura 2.11 - Comparação entre os modelos de *Surging* para a mistura ar-água, pressão manométrica de entrada de 50 kPa e rotação de 1800 RPM.

2.2.2 Manuseador de gás AGH.

Woon (1997) desenvolveu e testou o primeiro manuseador de gás por recirculação. Primeiramente, o autor avaliou o desempenho de uma BCS convencional verificando qual a condição operacional em que ocorria o *gas locking*. Modificando os estágios dessa mesma bomba, Woon (1997) observou uma melhora em seu desempenho. Os resultados mostraram que em determinada condição operacional o bloqueio ocorria com 31% de gás na bomba original e com 35% na bomba com os rotores perfurados, mostrando, portanto um aumento de 4% na tolerância da bomba a presença de gás.

Melvin *et al* (1998) estudaram o desempenho de BCSs operando com equipamento manuseador de gas (AGH) acoplado na sua entrada. Estudos experimentais mostraram uma melhora no desempenho de uma bomba centrífuga quando operando com escoamento bifásico. Os autores concluíram que esse equipamento promove uma uniformização e redução do tamanho das bolhas de gás, permitindo que a bomba opere com frações volumétricas de gás de cerca de 40%, bastante superior aos 10% que os sistemas convencionais de BCS conseguem operar.

Romero (1999) avaliou o desempenho de AGHs como uma alternativa para sistemas de bombeamento em poços com elevada RGO. O autor comparou o desempenho de uma BCS convencional com o desempenho do mesmo modelo de BCS com os estágios perfurados, o chamado manuseador de gás. Os resultados de Cirilo (1998) foram utilizados como referência para o sistema de bombeamento utilizando a BCS convencional. Os objetivos do trabalho foram gerar informações suficientes para caracterizar o manuseador de gás, permitindo um melhor dimensionamento e delimitar qual sua faixa operacional de trabalho. As curvas de desempenho do AGH sugeriram que o equipamento estudado é eficiente apenas dentro de uma faixa específica de vazão de líquido.

2.2.3 Bombas de BCS operando com fluido viscoso.

Amaral (2007) investigou a influência da viscosidade dos fluidos no desempenho de bombas centrífugas. Foram testadas três bombas centrífugas, uma radial convencional e duas BCSs de fluxo misto, operando com água e glicerina como fluidos de trabalho. As BCSs foram ensaiadas para diferentes velocidades de rotação (1800 a 3500 rpm), viscosidades (1 a 1020 cP) e vazões (0 a 14000 bbl/d). Partindo-se das leis de conservação de massa e quantidade de movimento, na forma unidimensional, aplicadas aos canais do rotor, o autor propôs um modelo dito generalista para previsão do comportamento do desempenho de BCS. Os dados experimentais obtidos foram utilizados para ajustar e validar o modelo proposto. Os resultados experimentais obtidos para as BCSs e os obtidos com a aplicação do modelo, foram também comparados com os valores fornecidos pelos ábacos do *Hydraulic Institute – USA*. Os resultados mostraram que para a altura de elevação os desvios não excedem 5%, porém para a vazão chegam a 28% e variam entre -25% a 17% para a eficiência.

Trevisan (2010) realizou um dos primeiros estudos experimentais para investigar a influência da viscosidade na degradação do desempenho de BCS, quando operando com escoamento bifásico gás-líquido. Na metodologia experimental empregada, foram mantidas constantes a velocidade de rotação, pressão de entrada, vazão de líquido e viscosidade, enquanto variou-se a vazão de gás. Devido a grande quantidade de variáveis envolvidas nos ensaios, o autor baseou-se nos parâmetros adimensionais para escoamento monofásico viscoso em BCS propostos por Solano (2009) para definir sua matriz experimental. O autor concluiu que o

aumento da viscosidade faz com que o ponto de *surging* ocorra para frações volumétricas de gás menores quando comparada com água, assim como a queda de desempenho global da bomba.

2.2.4 Visualização de escoamento bifásico em bombas centrífugas de BCS.

Estevam (2002) construiu um protótipo uma bomba centrífuga com carcaça em acrílico transparente com o objetivo de visualizar e analisar qualitativamente o escoamento no interior do rotor, possibilitando assim, a compreensão da fenomenologia do escoamento. Além da observação visual, foram feitas fotografias do escoamento com o auxílio de uma lâmpada estroboscópica e injeção de corante. O autor observou a acumulação de gás nos canais do rotor, sendo identificados dois padrões de escoamento: o primeiro padrão caracterizado pela presença de bolhas dispersas na estrada do rotor, já o segundo padrão, devido à coalescência das bolhas menores, apresenta a formação de uma grande bolha estacionária que ocupa a entrada do rotor. Após a bolha alongada ocorre uma região de remistura com predominância de bolhas dispersas, que dependendo do diâmetro podem sair ou ficarem retidas no canal do impelidor. O tamanho das bolhas estacionárias depende da velocidade de rotação, pressão de entrada e das vazões de ar e líquido, sendo observada a diminuição desse tamanho com o aumento da rotação, da vazão de líquido e da pressão. Porém, o aumento da vazão de ar promove o aumento do tamanho da bolha estacionária. Estevam (2002) constatou uma queda no desempenho da bomba com o aumento da fração de vazio. O *surging* é iniciado quando aparece a bolha alongada no canal do impelidor (regime estratificado) Quando a bolha alongada domina acima de 80% do comprimento do canal ocorre o fenômeno chamado *gas lock*.

Barrios (2007) desenvolveu um protótipo para visualização utilizando rotor e difusor de uma BCS convencional. Nos experimentos utilizou-se a mistura ar-água, sendo empregadas duas técnicas de visualização. Para a obtenção de uma “imagem congelada” do rotor, foi utilizada uma lâmpada estroboscópica e uma câmera fotográfica convencional. Com o objetivo de capturar a dinâmica do escoamento dentro do rotor, foram feitos vídeos com uma câmera de alta velocidade. Através do processamento das fotografias, obtidas com a câmera de alta velocidade, o autor mediu o diâmetro de bolha e utilizou essas informações no desenvolvimento de uma modelagem unidimensional para o escoamento no interior da BCS. Para o padrão de escoamento de bolhas dispersas, o autor observou que uma grande quantidade de bolhas recirculam ao longo dos canais do rotor. Com o aumento da fração volumétrica de gás, ocorre o aumento do tamanho das bolhas

e as linhas de recirculação, que estavam próximas as saídas dos canais, se aproximam da região de entrada. Para a condição de operação onde o *surging* ocorre, foi observada uma grande bolha alongada na entrada do rotor e as bolhas de gás localizadas na saída do canal alcançam a entrada do rotor por meio da recirculação. A bolha estacionária na entrada do rotor é levada pelo escoamento com o aumento da rotação.

Gamboa (2009) também construiu um protótipo de visualização com o objetivo de estudar o comportamento das bolhas de gás dentro do rotor de BCSs. O protótipo desenvolvido possui um difusor de entrada, um rotor e um difusor de saída, ambos de um modelo comercial de BCS. O rotor utilizado foi modificado retirando-se parte da parede externa, deixando expostas as pás e os canais do rotor, criando uma janela de visualização. O protótipo desenvolvido por Gamboa (2009) possui o *casing* do rotor e do difusor de saída em acrílico transparente. Entre o difusor de entrada e o rotor foi projetada uma nova janela de visualização, construída através do espaçamento entre esses componentes, o que possibilita visualização da região de entrada do rotor. Com o protótipo foi possível visualizar o padrão de escoamento dentro do difusor de saída, no rotor e na região de entrada do rotor. Nos experimentos realizados foram utilizadas diferentes combinações de fluidos, tais como água destilada e ar, água destilada e hexafluoreto de enxofre, e ar e uma mistura de isopropanol com água destilada. O autor identificou e descreveu o comportamento da fase gasosa para todos os padrões identificados e propôs um mapa de degradação do desempenho da bomba que relaciona as vazões das fases, os padrões de escoamento e o desempenho.

O autor identificou para o ponto de *surging* dois padrões de escoamento que ocorrem para as mesmas vazões de líquido e gás. Inicialmente um aglomerado de pequenas bolhas é identificado, seguido de uma transição para uma grande bolha estacionária, que segrega as fases líquido e gás. A formação da bolha estacionária ocorre mesmo para a elevação zero da bomba, indicando que a formação desse tipo de padrão nos canais do rotor é resultados da coalescência das bolhas. A fração crítica de gás que promove a formação dessa bolha estacionária varia em função da densidade do gás, enquanto a estabilidade dessa bolha é função da tensão interfacial entre as fases. Com o objetivo de verificar a influência da densidade da fase gasosa no ponto de *surging*, Gamboa (2009) utilizou uma mistura de água destilada e hexafluoreto de enxofre, que apresenta uma densidade seis vezes maior que o ar. Os resultados apresentados pelo autor mostram que o *surging* com hexafluoreto de enxofre ocorre em frações volumétricas bem

maiores do que com ar, no entanto a degradação do desempenho da bomba não é afetada, indicando que a redução de desempenho ocorre com uma fração de vazio crítica dentro do rotor. A influência da tensão superficial também foi avaliada por Gamboa (2008). Para estudar o efeito da tensão superficial foi utilizada uma solução de álcool em água e ar. De acordo, com os resultados a introdução de um surfactante diminuiu a coalescência das bolhas, fazendo com que o ponto de surging ocorra com frações maiores de gás.

Trevisan (2009) investigou a influência da viscosidade nos padrões de escoamento bifásico em BCS. Baseado nos trabalhos de Barrios (2007) e Gamboa (2008), o autor desenvolveu um protótipo de visualização que modificasse o mínimo o projeto de uma BCS convencional, de forma a apresentar resultados consistentes em relação às aplicações em campo. O protótipo foi ensaiado com as misturas água-ar e óleo-ar. Os experimentos foram realizados para diferentes velocidades de rotação (15, 25, 30 Hz), frações volumétricas de gás (maiores que 5%) e valores de viscosidade (1 a 161 cP). A visualização do escoamento foi feita com uma câmera de alta velocidade, as imagens foram registradas com velocidade do obturador (*shutter speed*) de 50 e 100ms e taxas de 600 a 1000 fps, dependendo da velocidade de rotação. O autor identificou cinco padrões de escoamento no interior do rotor: *Bubble Flow*, *Agglomerated Bubbles*, *Gas Pocket*, *Segregated Gas* e *Intermittent Gas*. Comparando as imagens com os dados de pressão, o autor concluiu que o padrão de escoamento *Agglomerated Bubbles* é responsável pelo início da deterioração do desempenho da bomba e a ocorrência do *surging* coincide com a presença do padrão *Gas Pocket*, indicando que esse fenômeno é um problema de instabilidade interfacial. Entretanto, o padrão *Gas Pocket* foi observado em condições de operação antes e depois do ponto de *surging*, indicando que esse é um fenômeno transiente.

3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de investigar o desempenho de bombas de BCS operando com escoamento bifásico gás-líquido, foi realizada a montagem experimental de um circuito de testes de BCS. As facilidades experimentais foram montadas no laboratório LABPETRO do Centro de Estudos de Petróleo (CEPETRO). Esse aparato experimental foi desenvolvido por Amaral (2007), sendo necessárias diversas alterações para o desenvolvimento do presente trabalho.

A seguir, serão apresentados a montagem experimental utilizada e os procedimentos adotados para a realização dos experimentos.

3.1 Circuito de Testes de BCSs.

O circuito de testes de BCSs é constituído de tanques, tubulação, trocador de calor, bomba de calor, *skid*, instrumentação e sistema de aquisição de dados. A Figura 3.1 mostra uma visão geral da montagem e a Figura 3.2 apresenta de forma esquemática o circuito de testes.



Figura 3.1 - Vista geral da montagem do circuito de testes.

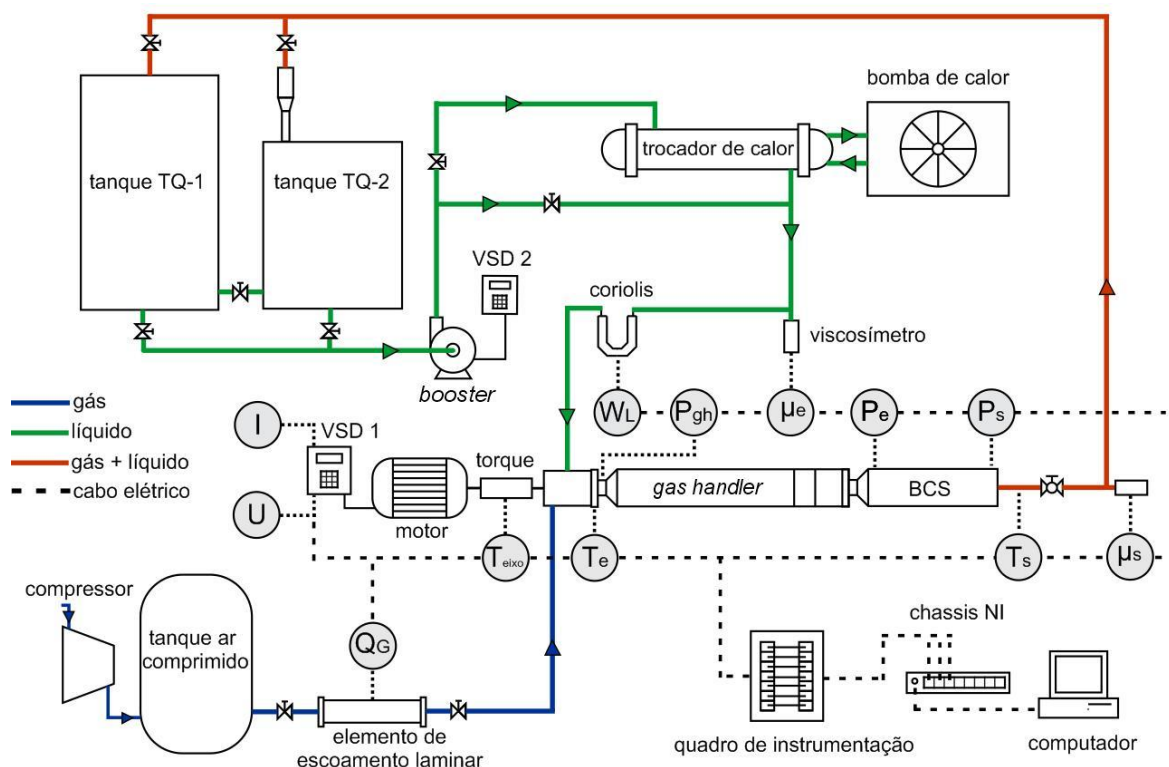


Figura 3.2 - Esquema do circuito de ensaios de bombas de BCS.

Conforme ilustrado na Figura 3.2, uma bomba *booster* bombeia água dos tanques TQ-1 e TQ-2 para a linha de testes. Além de vencer as perdas de carga ao longo da tubulação e acessórios, a bomba *booster* tem a função controlar a pressão na entrada da BCS. Esse ajuste de pressão na sucção da BCS é realizado pelo controle do inversor de frequências (VSD 2) que aciona o motor da bomba *booster*. A água bombeada pela bomba auxiliar segue pela tubulação podendo passar por um trocador de calor tipo casco-tubo, caso o controle de temperatura seja necessário. Antes de chegar à sucção da BCS, o fluido passa por um medidor de vazão mássico tipo Coriolis. O ar ambiente é utilizado como fase gasosa, que é comprimido e passa pelos medidos de vazão tipo laminador de fluxo antes de ser injetado na sucção da BCS. A mistura água-ar é bombeada pela bomba principal e retorna aos tanques, onde é feita a separação gravitacional das fases.

O controle de vazão da mistura bombeada é realizado por uma válvula manual tipo globo, instalada na tubulação de recalque, enquanto o controle da vazão de gás é realizado por uma válvula manual tipo agulha instalada na tubulação de ar, antes dos laminadores de fluxo.

A BCS é acionada por um motor elétrico de indução trifásico, 380 V, 50 cv, também controlado por um inversor de frequência (VSD 1), permitindo a realização dos ensaios em diversas rotações. No circuito de testes são medidas, também, pressão, temperatura e viscosidade na entrada e saída da BCS, torque no eixo de acionamento da bomba, corrente e tensão no motor elétrico.

No skid horizontal, onde o conjunto BCS-motor é fixado, os flanges de sucção e descarga estão interligados às linhas do sistema (Figura 3.3), sendo a principal vantagem deste tipo de instalação a possibilidade de troca da BCS instalada sem alterar o restante do circuito de testes.

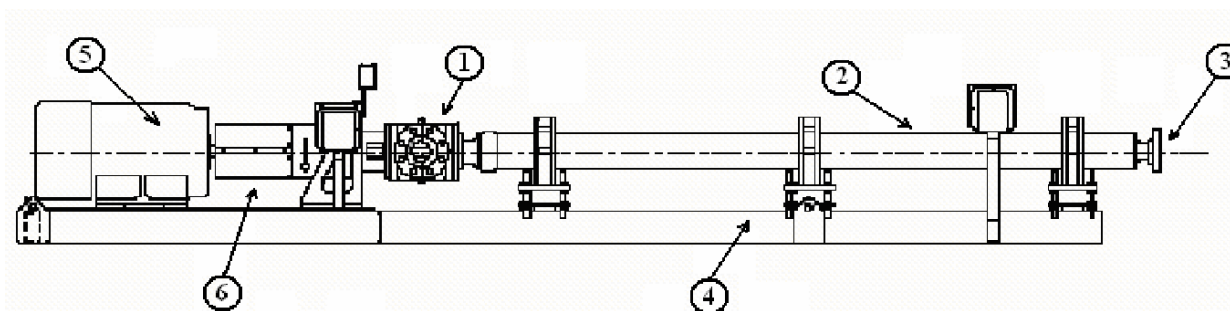


Figura 3.3 - Esquema do Skid horizontal de BCSs. 1- sucção da BCS, 2- bomba centrífuga submersa (BCS), 3- descarga da BCS, 4- base, 5- motor elétrico, 6- torquímetro.

A Tabela 3.1 apresenta em detalhes os equipamentos utilizados na montagem do circuito de testes. No Anexo I são mostrados as fotos dos equipamentos utilizados.

Tabela 3.1 – Equipamentos utilizados na montagem do circuito de testes de BCSs.

Equipamento	Modelo	Descrição
Conjunto motor-bomba (<i>booster</i>)	Imbil Ita 65-160	Bomba centrífuga <i>booster</i> de um estágio e motor elétrico WEG de 20 hp e 3600 rpm.
Motor elétrico	WEG	Acionamento da BCS, trifásico 380 V, 60 Hz, 50 hp, 3555 rpm.
Inversor de frequência	WEG GFW-09	Trifásico, 20 hp, 380 V, 60 Hz, microprocessado com <i>display</i> digital e comando através de teclado (acionamento da <i>booster</i>)
Inversor de frequência	WEG GFW-09	Trifásico, 20hp, 380 V, 60 Hz, microprocessado com <i>display</i> digital e comando via teclado (acionamento BCS)
Tanque TQ-1	-	Tanque cilíndrico em aço carbono com capacidade de 6 m ³ .
Tanque TQ-2	-	Tanque cilíndrico em fibra de vidro com capacidade de 1 m ³ .
Trocador de calor	FYTERM Ø 254x1200	Tipo casco/tubos, capacidade térmica 37000 kcal/h e área de troca de 7,18 m ² .
Bomba de calor	Carrier AQUASNAP 30RH20	Capacidade nominal de refrigeração 61,4 kW, aquecimento 62,5 kW e temperatura do fluido de trabalho de 5 a 56 °C.
Microcomputador	Dell Optiplex 360	Dell, Intel Core 2 Duo E7400 2,8GHz, 4Gb de memória RAM.
Acessórios	-	Tubos, conexões, válvulas, juntas.

3.2 Instrumentação e Sistema de Aquisição de Dados.

A instrumentação é de fundamental importância em trabalhos experimentais. A seleção dos sensores deve ser feita de maneira adequada à faixa de medição utilizada. A seguir, são apresentados os detalhes da instrumentação e do sistema de aquisição utilizado na montagem experimental.

A Tabela 3.2 apresenta todas as variáveis medidas durante os experimentos e a Tabela 3.3 mostra a descrição dos instrumentos utilizados. No Apêndice A é mostrado o procedimento e as curvas de calibração dos instrumentos de medição.

Tabela 3.2– Variáveis medidas no sistema de aquisição de dados.

Variável	Descrição
p_e	Pressão manométrica na sucção da BCS [Pa]
p_s	Pressão manométrica na descarga da BCS [Pa]
p_{gh}	Pressão manométrica na sucção do AGH [Pa]
p_{LFE}	Pressão manométrica no medidor laminar de vazão de gás [Pa]
p_{dif}	Pressão diferencial através do medidor laminar de vazão de gás [Pa]
$q_{G,LFE}$	Vazão volumétrica de gás no medidor de fluxo laminar [m^3/s]
W_L	Vazão de massa de líquido [kg/s]
T_{eixo}	Torque no eixo da BCS [N.m]
T_{LFE}	Temperatura no medido laminar de vazão [°C]
T_e	Temperatura na sucção da BCS [°C]
T_s	Temperatura na descarga da BCS [°C]
μ_e	Viscosidade do fluido na sucção da BCS [Pa.s]
μ_s	Viscosidade do fluido na descarga da BCS [Pa.s]
ω	Rotação da BCS [RPM]
I	Corrente no motor elétrico [A]
U	Tensão no motor elétrico [V]

Tabela 3.3 - Instrumentação utilizada.

Equipamento	Modelo	Descrição
Medidor de vazão mássica	Micro Motion Modelo DS300 H20 3SU	Medidor de vazão com princípio de funcionamento Coriolis de 3 ^o , saída analógica 4-20 mA, faixa de operação 0-190500 kg/h.
Medidor de vazão volumétrica de gás	Meriam Instruments Modelo 50MJ10-9	Medidor de vazão volumétrica de fluxo laminar, faixa de operação 0-3,18 CFM.
Medidor de vazão volumétrica de gás	Meriam Instruments Modelo 50MJ10-12	Medidor de vazão volumétrica de fluxo laminar, faixa de operação 0-0,409 CFM.
Computador de vazão	Meriam Instruments Series 1900	Computador de vazão mássica e volumétrica com saída analógica 4-20 mA e display digital.
Transdutor de pressão	One Series	Medidor de pressão com faixa de operação até 125 psi e saída analógica de 4-20 mA.
Transdutor de pressão	Omega PX750	Medidor diferencial de pressão com faixa de operação até 30 in H ₂ O e saída analógica de 4-20 mA.
Transdutor de pressão	Rosemount Smart 1151	Medidores diferenciais de pressão com faixas de operação 0-4 bar, saída analógica de 4-20 mA.
Sensor de temperatura	PT 100	Sensor de temperatura RTD com faixa de operação 0-100 °C
Torquímetro	Lebow Modelo 1805-5k	Sensor de torque e rotação com condicionador de sinais modelo DP-41S, capacidade de 565 N.m e rotação máxima de 22000 RPM.
Condicionador de sinais	Lebow Modelo 7541	Condicionador de sinais com display digital indicador de torque, potência e rotação e saída analógica 0-10 V.
Viscosímetro	Sofraser MIVI 8001	Viscosímetro de processo com unidade de processamento eletrônica, faixa de operação até 10000cp e saída analógica 4-20 mA.
Aquisição de sinais	National Instruments NI USB 9162/9172	Chassis para módulo de aquisição de sinais com saída USB.
Módulo de aquisição de sinais	National Instruments NI 9201	Condicionador de sinais analógicos de 8 canais, ± 10 V e taxa de aquisição de 500 kS/s.
Módulo de aquisição de sinais	National Instruments NI 9203	Condicionador de sinais analógicos de 8 canais, 4-20 mA e taxa de aquisição de 200 kS/s.
Módulo de aquisição de sinais	National Instruments NI 9219	Condicionador de sinais universal (corrente, tensão, resistência, termopar e RTD), 4 canais.
Câmera	RedLake Motion Pro X3	1000 fps com resolução de 1280x1024

O sistema de aquisição de dados é composto de um microcomputador, módulos de aquisição de sinais e *software* de processamento. São utilizados diferentes módulos de aquisição conforme os sinais de saída dos instrumentos. A saída dos instrumentos são sinais de corrente (4-20 mA) ou tensão (0-10V). Um terceiro módulo é utilizado somente para a aquisição da temperatura (sensores PT 100). Nos módulo de aquisição, Figura 3.4, os sinais analógicos são recebido dos instrumentos, condicionados e digitalizados. Através do software LabVIEW esses sinais são processados, apresentados ao usuários na forma de média ou gráficos e salvos em arquivos com extensão *txt*.

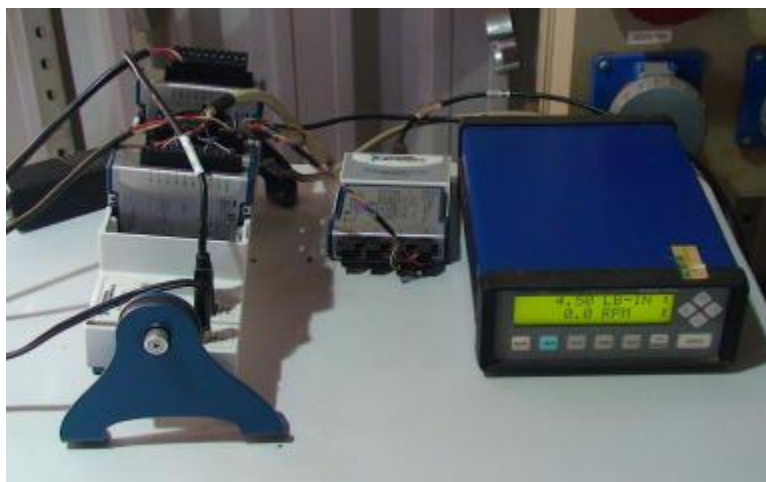


Figura 3.4 - Módulos de aquisição de sinais

A rotina computacional desenvolvida facilita a realização dos ensaios, pois na interface gráfica do programa, Figura 3.5, são mostrados em tempo real os sinais vindos dos instrumentos de medição e o comportamento das curvas de desempenho que estão sendo obtidas.

As incertezas associados aos instrumentos e as variáveis de desempenho calculadas são apresentadas no Apêndice B.

3.2.1 Sistema de injeção de ar.

A medição da vazão de ar é realizada através de elementos de escoamento laminar. São utilizados dois instrumentos de diferentes faixas operacionais ligados em paralelo. A escolha do sensor empregado na medição é definida de acordo com a vazão de gás necessária durante os testes.

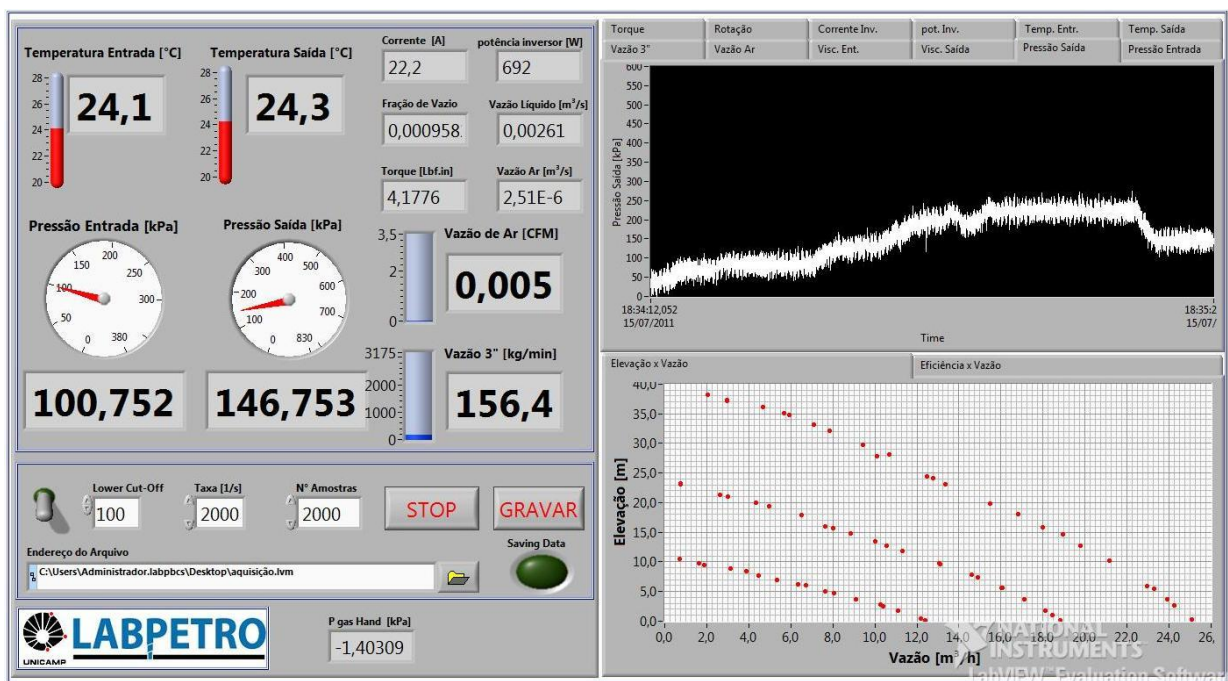


Figura 3.5 - Interface gráfica do sistema de aquisição de dados.

Os elementos de fluxo laminar são projetados para produzir um diferencial de pressão diretamente proporcional à vazão. Esses instrumentos possuem uma seção de medição composta de inúmeros tubos de diâmetro pequenos o suficiente para que o escoamento interno seja laminar, independente do tipo de escoamento no tubo principal. Para cada tubo de escoamento laminar tem-se o chamado escoamento de Poiseuille, onde a vazão é dada por:

$$q_{tubo} = \frac{\pi D_{tubo}^4}{128 \mu L_{tubo}} \Delta p \quad (3.1)$$

Desse modo, a vazão em cada tubo é uma função linear do diferencial de pressão através do medidor e a vazão total é a soma das vazões em todos os tubos. A relação entre queda de pressão e vazão depende da viscosidade do fluido, que é função da temperatura. Portanto, a temperatura do fluido deve ser conhecida para uma medição precisa utilizando os elementos de fluxo laminar.

No sistema de medição de vazão de ar utilizado neste trabalho, a curva de calibração é fornecida pelo fabricante. Um computador de vazão é utilizado para processar e retransmitir os resultados fornecidos pelo elemento laminar de fluxo. A Figura 3.6 mostra de forma esquemática o aparato utilizado na medição de vazão de ar.

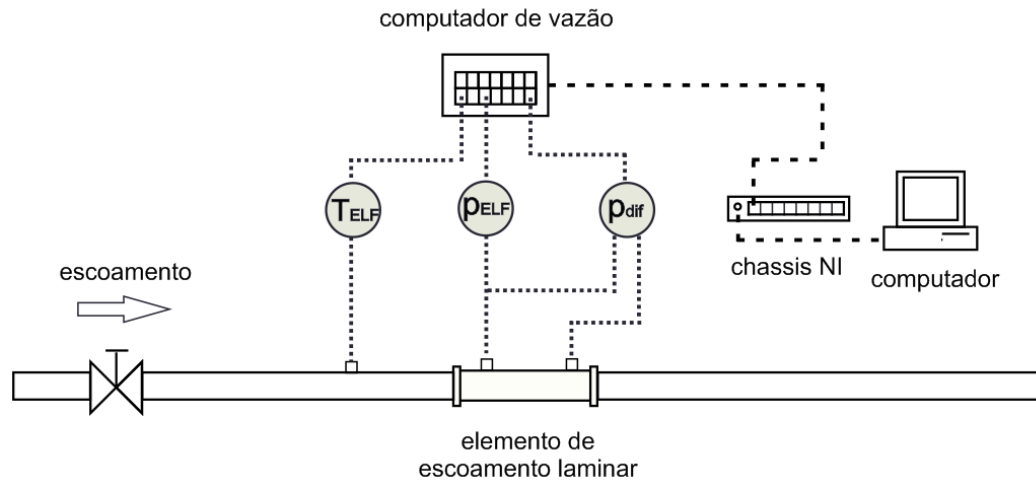


Figura 3.6 - Esquema da medição de vazão de ar.

No computador de vazão é inserida a curva de calibração do elemento de escoamento laminar, assim como medidas de temperatura, diferencial de pressão e pressão manométrica. Através do diferencial de pressão o computador calcula a vazão de gás em relação às condições padrões nas quais ele foi calibrado. Esse valor é corrigido para as condições de trabalho através dos valores locais de temperatura e pressão. A vazão volumétrica de ar calculada pelo computador de vazão é enviado ao sistema de aquisição de dados através de um sinal de 4-20 mA. Outras variáveis tais como massa específica, vazão mássica, temperatura e pressão são disponíveis no visor no computador.

Devido à compressibilidade do ar a vazão volumétrica no medidor é diferente da vazão volumétrica na sucção da bomba. Como é necessário saber a vazão volumétrica na sucção da bomba, torna-se necessário fazer uma correção da vazão medida para as condições da sucção. Aplicando a conservação da massa de ar entre o medidor e a sucção da bomba, tem-se:

$$q_G = \frac{q_{G,LFE} \cdot \rho_{G,LFE}}{\rho_G} \quad (3.2)$$

onde $q_{G,LFE}$ é a vazão volumétrica de gás medida pelo laminador de fluxo e $\rho_{G,LFE}$ é massa específica do gás nas condições termodinâmicas do medidor, calculada pelo computador de vazão.

A massa específica do ar (ρ_G) na sucção da bomba é calculada utilizando a lei de gás perfeito,

$$\rho_G = \frac{p_{e,abs}}{R_{ar} \cdot T_{e,abs}} \quad (3.3)$$

onde:

$$p_{e,abs} = p_e + p_{atm} \quad (3.4)$$

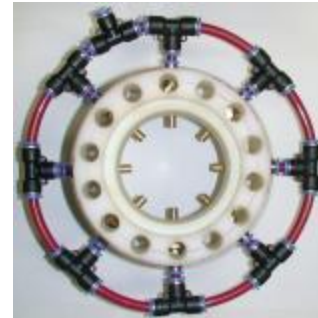
$$T_{e,abs} = T_e + 273,15 \quad (3.5)$$

sendo $p_{e,abs}$ e $T_{e,abs}$ pressão absoluta e temperatura absoluta na entrada da bomba.

Depois de medida a vazão, o ar é injetado na entrada da bomba através de um bocal contendo oito injetores, conforme mostrado na Figura 3.7. Cada injetor possui dezoito orifícios de 0,5 mm de diâmetro. O ar é injetado dessa forma a fim de homogeneizar a mistura. Uma válvula de retenção é instalada antes do bocal injetor com a finalidade de impedir o retorno de líquido aos medidores de vazão de gás.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.7 - Injetores de gás. (a) Vista do bocal com oito injetores; (b) Vista frontal do bocal injetor; (c) Detalhe de um injetor.

3.3 BCS GN 7000 e AGH

Para testar o desempenho de bombas de BCS operando com escoamento bifásico gás-líquido foi escolhida a bomba GN 7000, fabricada pela Schlumberger. Esse modelo de BCS operando a 3500 rpm apresenta no BEP vazão de 7390 bbl/d ($49 \text{ m}^3/\text{h}$) e altura de elevação de 95 pés (29 m). Os rotores são do tipo fluxo misto com rotação específica, n_E , de 3850 (em unidades da Equação 2.2). A escolha desse modelo deve-se a sua ampla utilização na indústria e também pelas limitações de montagem em condições de laboratório.

A BCS GN 7000 testada possui três estágios, sendo as características dos rotores e difusores mostradas nas Tabelas 3.4 e 3.5, respectivamente.

Tabela 3.4– Características geométricas dos rotores.

REDA GN 7000 - Rotores	
Número de Aletas	7
Espessura mínima e máxima da aleta	2 mm / 3 mm
Diâmetro Interno (d)	51 mm
Diâmetro Externo (D)	89 mm
Ângulo de entrada (β_1)	28°
Ângulo de saída (β_2)	36°
Altura do canal de entrada (b_1)	17,3 mm
Altura do canal de saída (b_2)	15,7 mm

Tabela 3.5 – Características geométricas dos difusores.

REDA GN 7000 - Difusores	
Número de Aletas	7
Espessura mínima e máxima da aleta	3 mm / 4 mm
Diâmetro Interno entrada (d_e)	83 mm
Diâmetro Externo entrada (D_e)	108 mm
Diâmetro Interno saída (d_s)	42 mm
Diâmetro Externo saída (D_s)	74 mm
Ângulo de entrada (β_2)	90°

A bomba GN 7000, Figura 3.8, sofreu alterações em seu projeto original com a finalidade de permitir a visualização do escoamento em seu interior. As modificações consistiram em substituir as peças metálicas da carcaça por peças fabricadas em acrílico, alterando o mínimo possível sua geometria original.



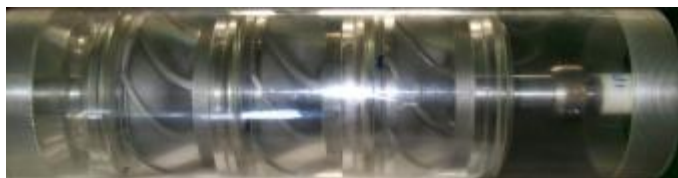
Figura 3.8 - Bomba GN 7000 original: (a) vista geral da bomba; (b) bomba desmontada destacando seus três estágios.

Para permitir a visualização do interior dos canais do difusor, a carcaça metálica desses componentes foi removida e uma nova carcaça em acrílico foi desenvolvida. A Figura 3.9 mostra os difusores da bomba GN 7000 antes e depois das modificações.



Figura 3.9 - Modificações na carcaça do difusor.

A carcaça metálica externa da bomba foi substituída por um tubo de acrílico de 3 mm de espessura. Essa modificação foi responsável pela acentuada diminuição da pressão de operação suportada pela bomba. Com essas modificações a pressão de operação máxima suportada é cerca de 400 kPa. A Figura 3.10 mostra as modificações na carcaça externa e a bomba montada.



(a)



(b)

Figura 3.10 - Bomba modificada: (a) substituição da carcaça externa por um tubo acrílico; (b) bomba com modificações prontas.

O manuseador de gás AGH sofreu alterações no seu projeto original. Uma janela de visualização foi construída na sucção do equipamento, permitindo a visualização do escoamento nessa região. A Figura 3.11 mostra as modificações realizadas.



Figura 3.11 - Manuseador de gás com janela de visualização na sucção.

3.4 Procedimentos Experimentais.

Os ensaios experimentais realizados têm como objetivo a determinação do desempenho da BCS operando em diferentes condições operacionais. Os resultados obtidos são curvas de elevação, potência e eficiência versus vazão.

Os procedimentos experimentais adotados são apresentados a seguir, conforme o tipo de teste realizado.

3.4.1 Testes de desempenho para escoamento monofásico com líquido.

Embora o objetivo do trabalho seja investigar o desempenho de BCSs operando com mistura gás-líquido, os testes de desempenho monofásicos são de grande importância, pois servem como referência para os demais resultados.

A seguir, é apresentado o procedimento adotado nos testes monofásicos, com água, da bomba GN 7000. Esse procedimento também foi aplicado aos testes monofásicos do manuseador de gás (AGH).

1. Liga-se a bomba *booster* e, a seguir, a bomba BCS, fixando uma rotação para a BCS através do inversor de frequência. A rotação da BCS permanece fixa ao longo de todo o ensaio.
2. Com a válvula globo totalmente aberta, ajusta-se uma rotação para a bomba *booster* de forma que o fluido chegue com pressão positiva na sucção da BCS e que a pressão gerada pela BCS seja nula. Esse ponto corresponde à vazão máxima, ou condição operacional de *head* nulo.
3. Esperam-se aproximadamente três minutos para que a condição operacional se estabilize.
4. Realiza-se a aquisição dos dados durante um intervalo de 30 segundos.
5. Para a próxima condição operacional da BCS, restringe-se o escoamento através do fechamento da válvula globo até a vazão desejada. Repetem-se os procedimentos 3 e 4.

O procedimento 5 é realizado até que a condição de *shut-off* seja estabelecida. Nessas condições a vazão é nula e a altura de carga (*head*) gerada pela bomba é máxima. A determinação de qual deve ser o fechamento da válvula e conseqüentemente redução da vazão, depende da resolução desejada para os resultados dos ensaios. Para ensaios monofásicos são coletados em média quinze pontos ao longo de toda a curva de desempenho.

Para garantir que os resultados independem do sentido de realização dos testes, alguns experimentos foram realizados em ambos os sentidos, ou seja, vazão crescente e vazão decrescente. Para os ensaios em sentido crescente de vazão, o procedimento experimental é semelhante ao descrito acima. No entanto, o teste tem início na condição de *shut-off*, sendo realizada a abertura da válvula globo em incrementos determinados até o término do teste no ponto de operação de vazão máxima.

3.4.2 Testes de desempenho para escoamento bifásico.

Nos testes de desempenho de BCS operando com escoamento bifásico gás-líquido, a mistura água-ar foi utilizada como fluido de trabalho.

O procedimento experimental desenvolvido, embora bastante trabalhoso do ponto de vista operacional, busca facilitar a análise dos resultados experimentais. Os testes são realizados à uma fração volumétrica de gás constante. Outro parâmetro operacional controlado durante os ensaios é a pressão de sucção da BCS, que é mantida constante ao longo de toda a curva de desempenho.

A seguir, é descrito o procedimento experimental adotado para os testes bifásicos da BCS GN 7000 e para o manuseador de gás (AGH).

1. Liga-se a bomba *booster* e, a seguir, a bomba BCS, fixando uma rotação para a BCS através do inversor de frequência. A rotação da BCS permanece fixa ao longo de todo o ensaio.
2. Através do controle da rotação da bomba *booster*, fixa-se a pressão na sucção da BCS. Essa pressão deve ser mantida constante ao longo de todo o experimento.
3. Regula-se a vazão de gás de forma a obter-se a vazão volumétrica de gás desejada. Esse valor também é mantido constante. Quanto a vazão de gás é alterada, a pressão de sucção também altera. Dessa forma, é necessário ajustar novamente a rotação da bomba *booster* até que a pressão de sucção seja a desejada.
4. Com esses três parâmetros ajustados, pressão de sucção, fração volumétrica de gás e rotação da BCS, esperam-se aproximadamente três minutos para que a condição operacional se estabilize.
5. Realiza-se a aquisição dos dados durante um intervalo de 30 segundos.
6. Para o ajuste da próxima condição operacional de vazão, diminui-se a rotação da bomba *booster* e em seguida ajusta-se a vazão de ar e água até que a fração volumétrica seja a desejada. Ajusta-se novamente a rotação da bomba *booster* de forma a manter constante a pressão de sucção na BCS. Trata-se de um processo iterativo de abertura de válvulas e ajuste de rotação da bomba *booster* até que sejam estabelecidas as desejadas.

Os procedimentos 5 e 6 são repetidos até que a vazão de mistura seja 10% da vazão máxima, condição que caracteriza o final do teste. O espaçamento entre os pontos coletados depende das características do teste. Para a porção inicial da curva de desempenho, altas vazões,

adota-se um espaçamento maior dos pontos. Já para a região próxima do ponto de *surging*, a diminuição da vazão ocorre de forma a aumentar a resolução da curva de desempenho e melhor identificar esse ponto de início de instabilidades.

3.4.3 Testes de desempenho do conjunto GN 7000 + AGH com escoamento bifásico.

O manuseador de gás, AGH, tem como objetivo aumentar a tolerância da BCS à presença de gás. Para testar a efetividade do seu desempenho foi testado o conjunto bomba BCS GN 7000 e AGH. Para se estabelecer uma comparação entre os resultados, tanto para a operação apenas da BCS, quanto para o conjunto, às condições de pressão na sucção da BCS são mantidas constantes. Portanto, esse procedimento busca avaliar as mudanças nas características do escoamento causadas pelo manuseador de gás e qual seu efeito no desempenho da BCS.

O procedimento experimental é idêntico ao adotado nos testes de desempenho apenas da BCS.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados experimentais obtidos para os testes de desempenho da BCS e do AGH. Primeiramente, são apresentados os resultados da operação desses equipamentos apenas com água e em seguida são apresentados os resultados da operação com a mistura água-ar.

Embora os objetivos principais deste trabalho sejam avaliar o desempenho de bombas de BCS operando com escoamento bifásico gás-líquido, os resultados de desempenho com escoamento monofásico são de fundamental importância para comissionar o funcionamento do aparato experimental e também servirem de referência para os demais resultados.

Todos os resultados apresentados neste capítulo estão disponíveis em tabelas no Anexo II. As curvas fornecidas pelo fabricante são apresentadas no Anexo III.

4.1 Escoamento Monofásico com Água.

Em trabalhos experimentais, além do conhecimento das incertezas relacionadas às medidas, é importante avaliar a repetitividade dos resultados. Buscando avaliar a repetitividade entre testes nas mesmas condições operacionais, foram realizados cinco testes de desempenho da BCS GN 7000. Os testes foram realizados nos sentidos crescente e decrescente de vazão, restringe-se o fluxo até a vazão nula e em seguida partindo-se dessa vazão até a vazão máxima novamente. As Figuras 4.1 a 4.3 apresentam as curvas de desempenho para os ensaios de repetitividade realizados a 1800 rpm.

A curva de elevação mostrada na Figura 4.1 apresenta uma repetitividade satisfatória em relação aos testes diferentes e também ao sentido (vazão crescente ou decrescente) que o ensaio é realizado. Isso mostra que o desempenho medido da bomba não é influenciado por essas variáveis. As curvas de potência mecânica consumida e eficiência, Figuras 4.2 e 4.3 respectivamente, apresentam uma dispersão maior dos resultados em relação à curva de altura de carga. Isso ocorre possivelmente devido à faixa operacional do torquímetro utilizado. Esse instrumento possui limite de operação de 5000 lbf.in, no entanto nos experimentos atinge-se uma

valor de torque na ordem de 100 lbf.in, portanto próximo ao limiar de operação do instrumento. Embora a dispersão seja maior, a tendência dos resultados ainda é bastante satisfatória.

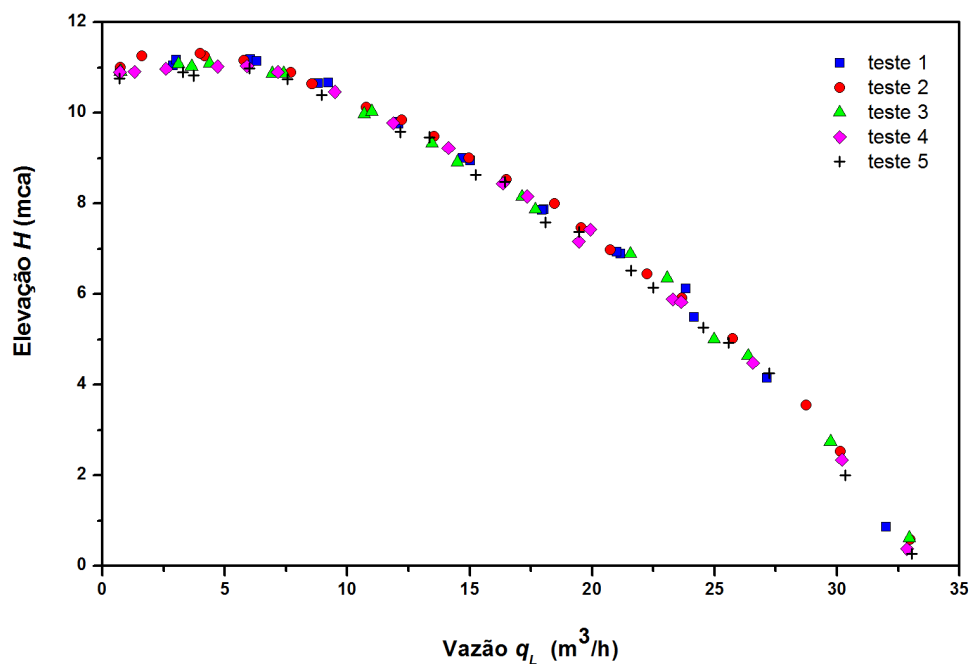


Figura 4.1 - Ensaios de repetitividade para a curva de desempenho bomba GN 7000 operando com três estágios e rotação de 1800 rpm.

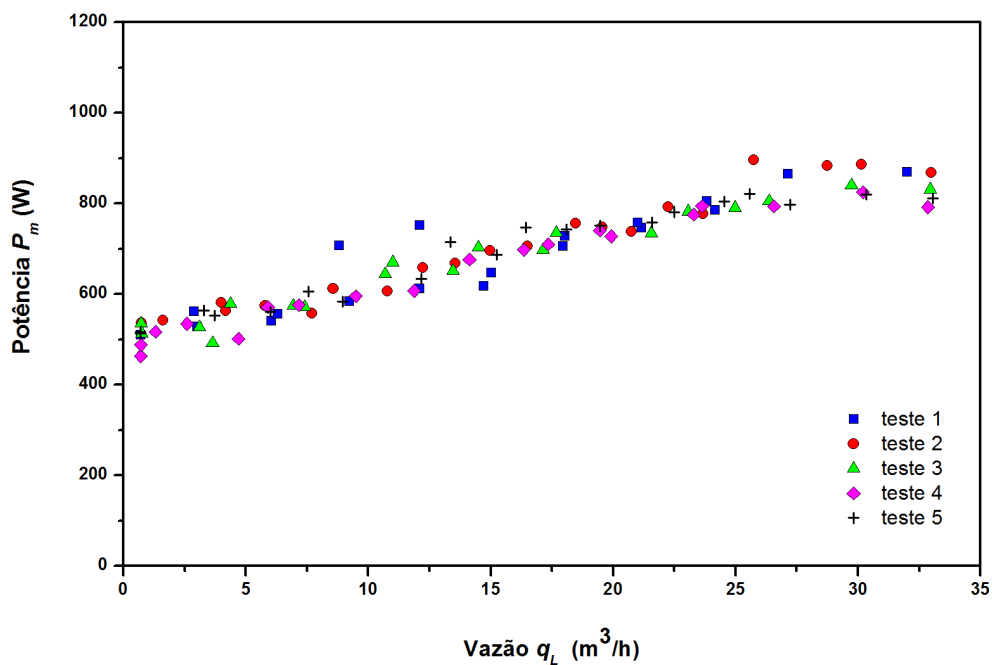


Figura 4.2 - Ensaios de repetitividade para a curva de potência consumida da bomba GN 7000 operando com três estágios e rotação de 1800 rpm.

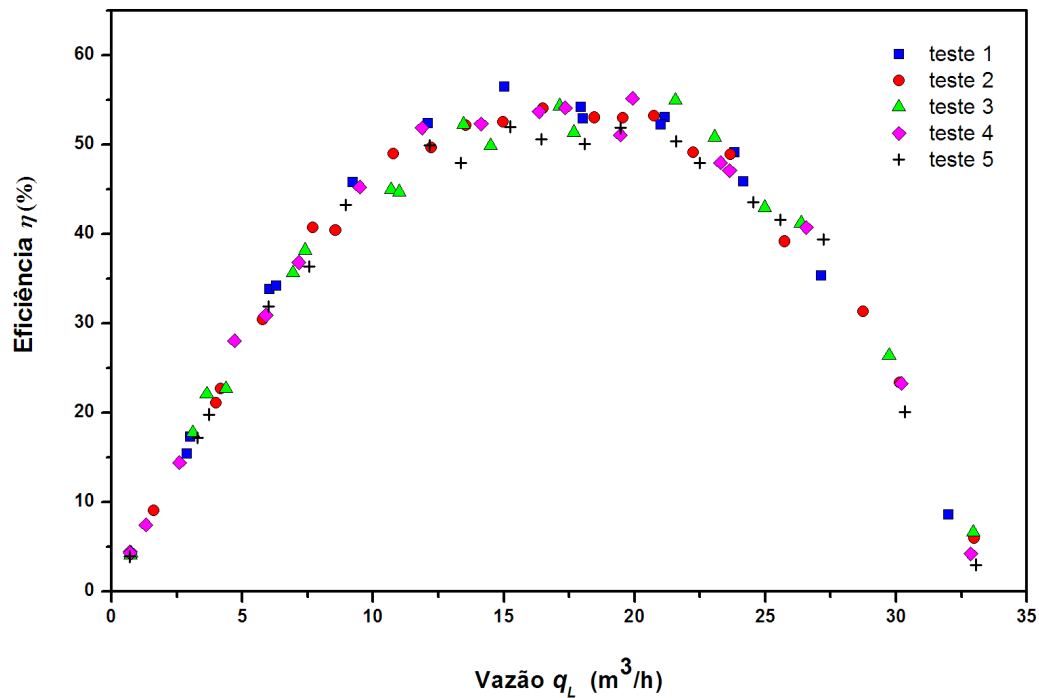


Figura 4.3 - Ensaio de repetitividade para a curva de eficiência da bomba GN 7000 operando com três estágios e rotação de 1800 rpm.

A Figura 4.4 mostra os efeitos das alterações da construção da bomba em seu desempenho. O desempenho da bomba protótipo é comparado com desempenho fornecido pelo fabricante e também com os resultados obtidos por Amaral (2007) com a mesma bomba sem alterações. Conforme mostrado na Figura 4.4, o desempenho do protótipo é bastante próximo dos resultados do fabricante e de Amaral (2007) na região próxima do *shut-off*. No entanto, para vazões intermediárias e elevadas esses resultados divergem, sendo o desempenho do protótipo inferior aos dos demais. Essa redução no desempenho do protótipo deve-se possivelmente as alterações realizadas em seu projeto original. Uma alteração significativa realizada no projeto da bomba foi a substituição do acoplamento entre o eixo da bomba e o eixo do mancal. Esse acoplamento teve seu diâmetro aumentado, restringindo significativamente a área livre para o escoamento do fluido. O aumento significativo da velocidade provocado pela restrição da área pode ter contribuído para a redução do desempenho.

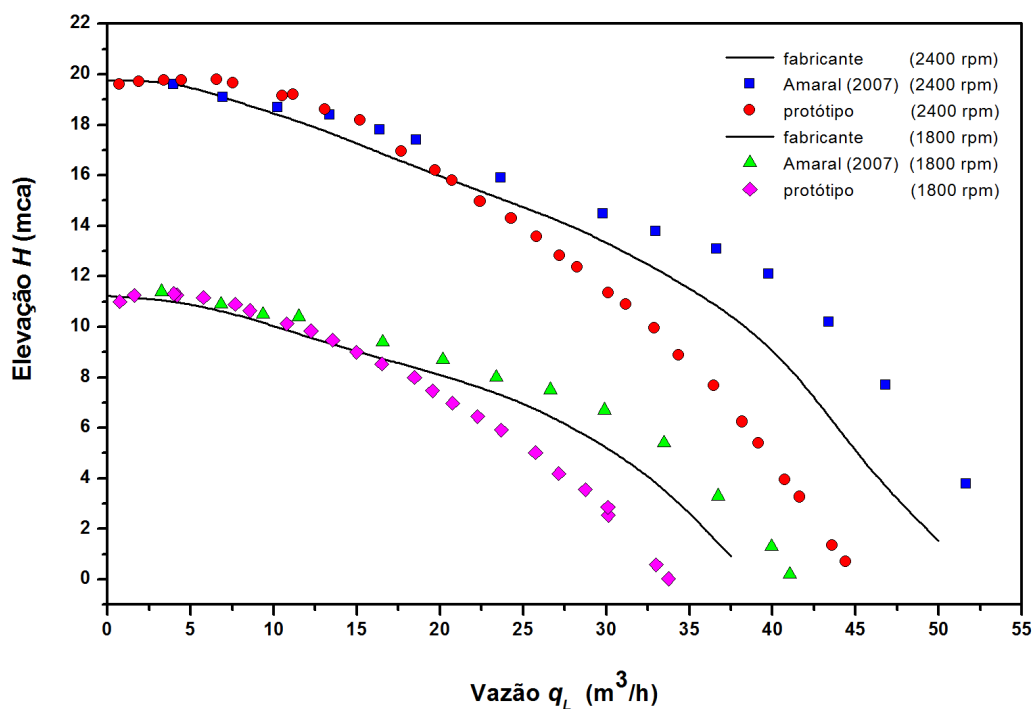


Figura 4.4 - Comparação entre o desempenho medido do protótipo, fabricante e Amaral (2007).

Outra maneira de verificar o funcionamento adequado tanto da bomba quanto do aparato experimental é com a aplicação do conceito de similaridade em bombas. Devido às modificações realizadas no projeto original da BCS GN 7000, testes em diferentes rotações foram realizados para verificar a similaridade em diferentes condições operacionais. As Figuras 4.5 a 4.7 mostram os resultados para o coeficiente de carga, potência e rendimento em função do coeficiente de vazão, respectivamente. Como pode ser visto nessas figuras os pontos descrevem basicamente a mesma curva, atendendo as relações de similaridade em bombas centrífugas.

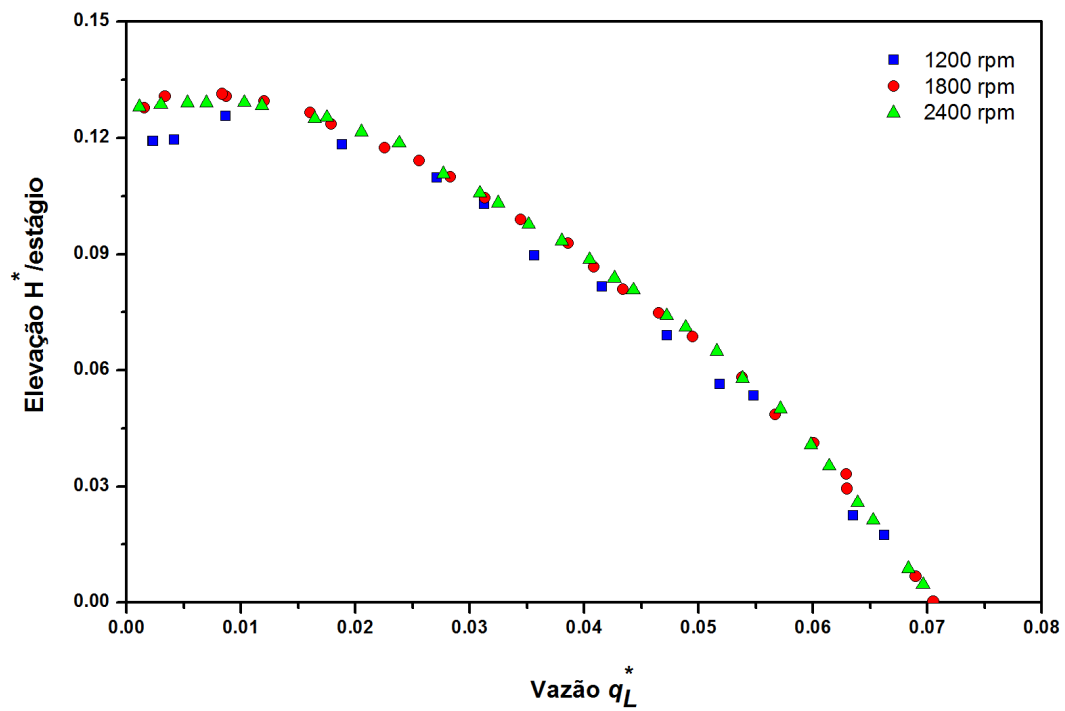


Figura 4.5 - Testes de similaridade aplicada a bomba GN 7000: coeficiente de carga para a bomba operando com água nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm.

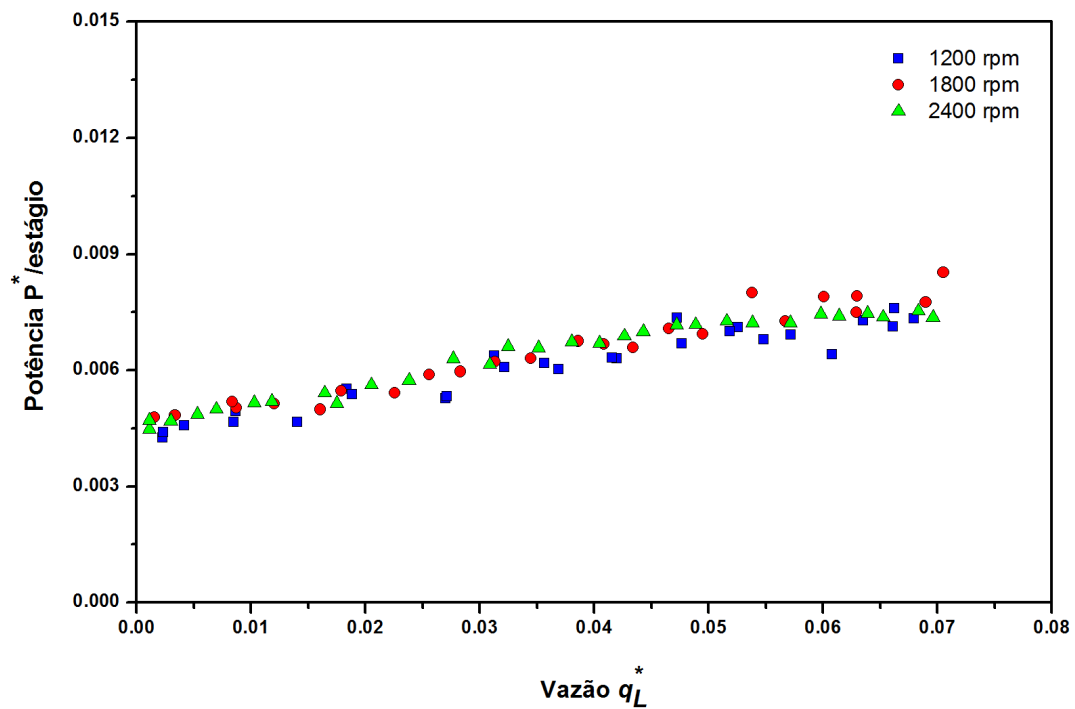


Figura 4.6 - Testes de similaridade aplicada a bomba GN 7000: coeficiente de potência para a bomba operando com água nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm.

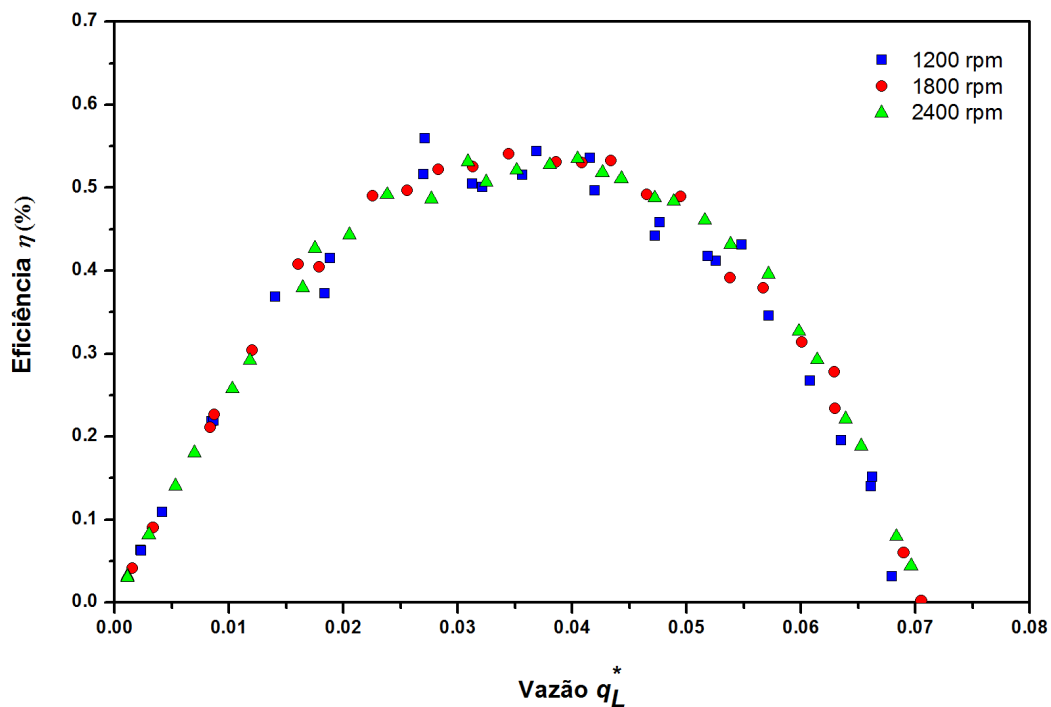


Figura 4.7 - Teste de similaridade aplicada a bomba GN 7000: eficiência para a bomba operando com água nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm.

Devido à falta de dados técnicos do manuseador de gás foi necessária a realização de testes de desempenho monofásico desse equipamento, buscando definir adequadamente suas características de operação. As Figuras 4.8 a 4.10 apresentam os resultados dos coeficientes de carga, potência e eficiência em função do coeficiente de vazão, respectivamente. Os ensaios foram realizados nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm. Conforme mostrado nesses resultados, as curvas desses adimensionais possuem boa concordância, evidenciando que a lei de similaridade também se aplica ao manuseador de gás. Não foi possível verificar a influência das modificações realizadas no AGH devido à falta de dados de referência.

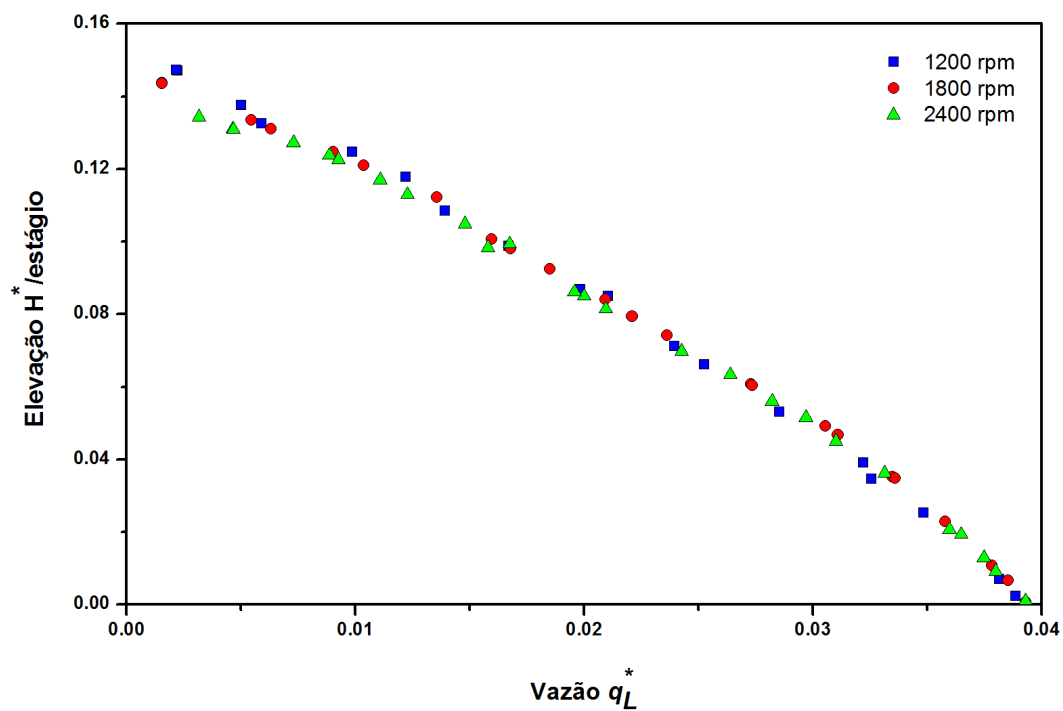


Figura 4.8 - Testes de similaridade aplicada ao AGH: coeficiente de carga para o manuseador de gás operando com água nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm.

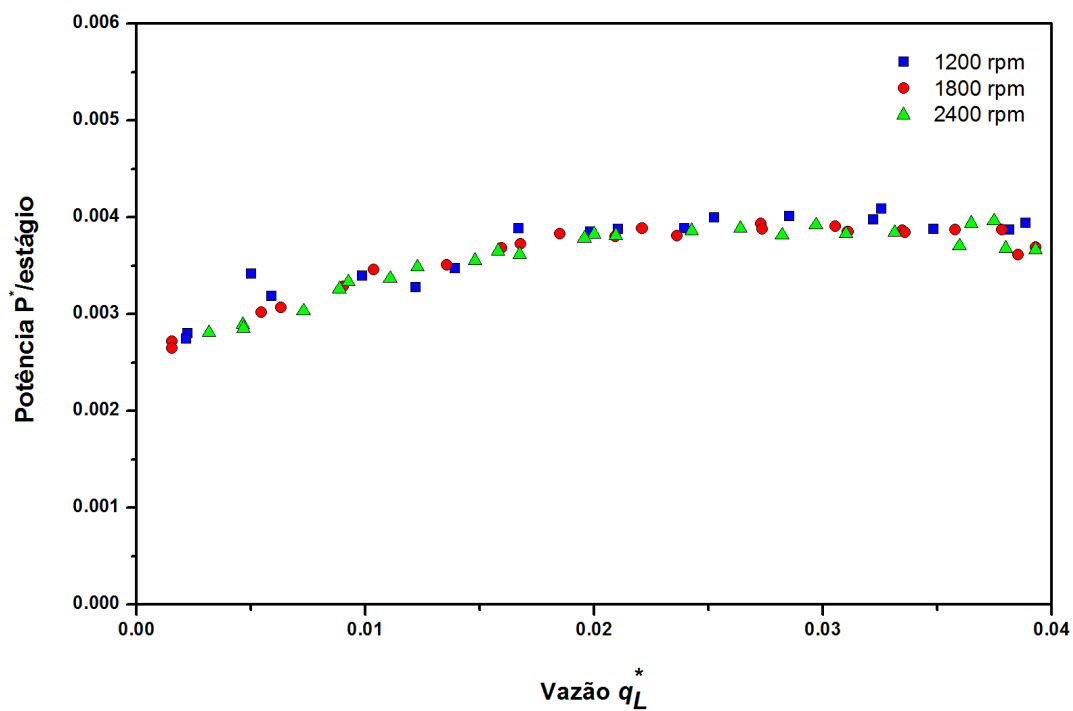


Figura 4.9 - Testes de similaridade aplicada ao AGH: coeficiente de potência para o manuseador de gás operando com água nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm.

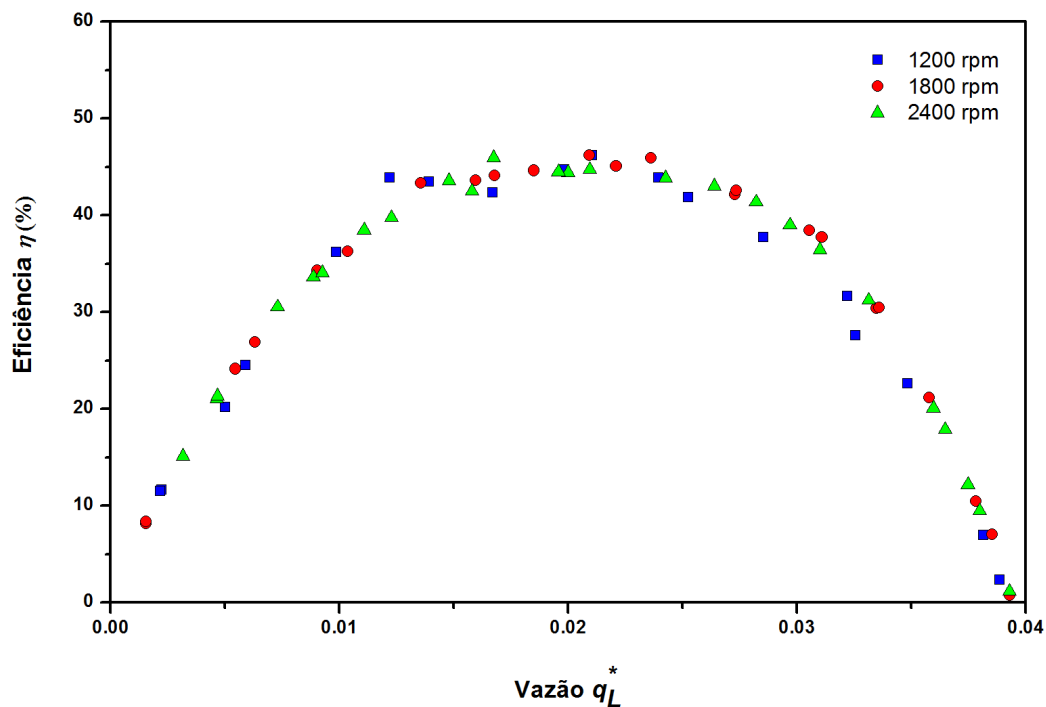


Figura 4.10 - Testes de similaridade aplicada ao AGH: eficiência para o manuseador de gás operando com água nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm.

O manuseador de gás escolhido para os testes possui o número de estágios recomendado pelo fabricante para operar em conjunto com a BCS GN 7000. As Figuras 4.11 a 4.13 mostram a comparação entre as características de desempenho desses dois equipamentos.

Conforme observado nas Figuras 4.11 a 4.13, a bomba e o manuseador possuem características operacionais bastante distintas. A principal diferença refere-se a vazão característica dos equipamentos. A bomba GN 7000 opera em uma faixa de vazão de quase o dobro do manuseador de gás. Para a região do BEP a bomba apresenta uma maior capacidade de elevação maior quando comparada com o manuseador de gás. Esses resultados sugerem que esse modelo de AGH não é adequado para operar com a BCS GN 7000, pois a região de perdas é bastante acentuada, sendo portando a região de atuação do AGH reduzida. Embora a bomba consuma mais potência para o seu funcionamento, ela possui uma maior eficiência em relação ao AGH. A perda de eficiência do manuseador de gás deve-se as perdas por recirculação provocada nos orifícios perfurados nos rotores e difusores do equipamento. A energia gasta para recircular o fluido entre o rotor e o difusor do AGH consome potência útil, que deixa de ser convertida em capacidade de elevação reduzindo sua eficiência.

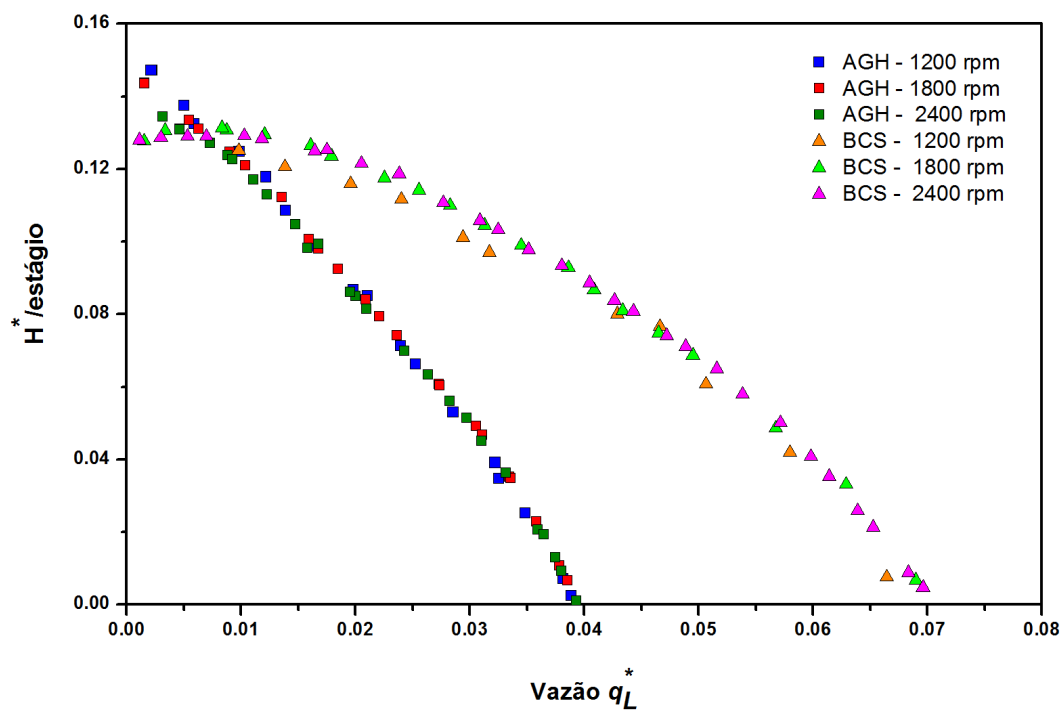


Figura 4.11 - Comparação entre AGH e GN 7000: coeficiente de carga versus coeficiente de vazão para a operação com água em diferentes velocidades de rotação.

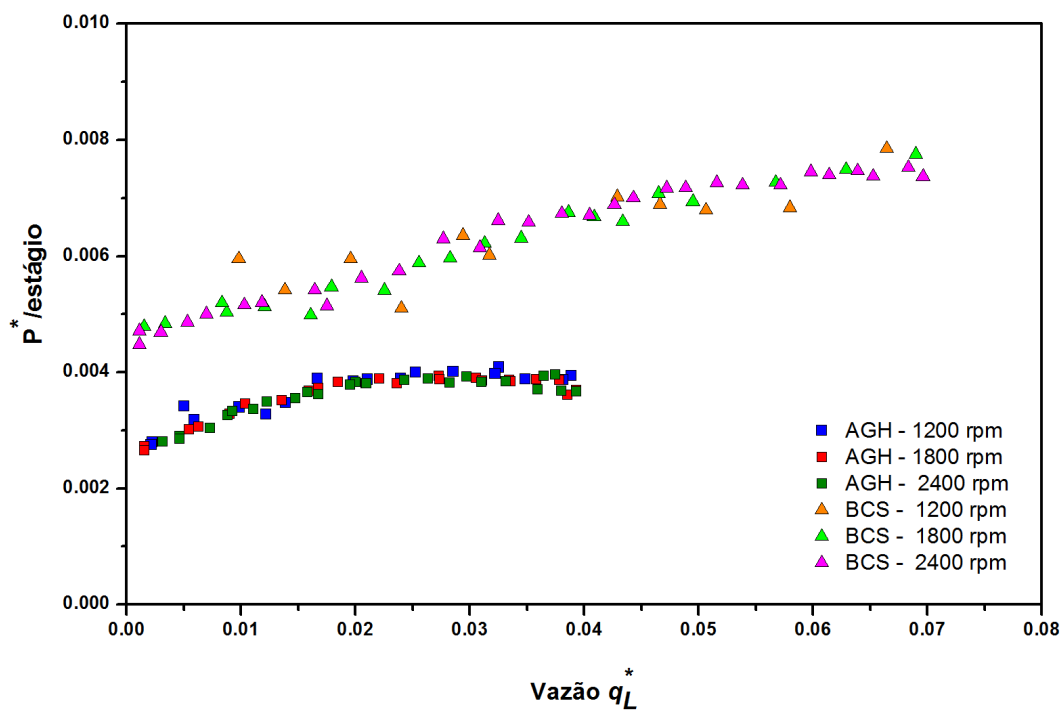


Figura 4.12 - Comparação entre AGH e GN 7000: coeficiente de potência versus coeficiente de vazão para a operação com água em diferentes velocidades de rotação.

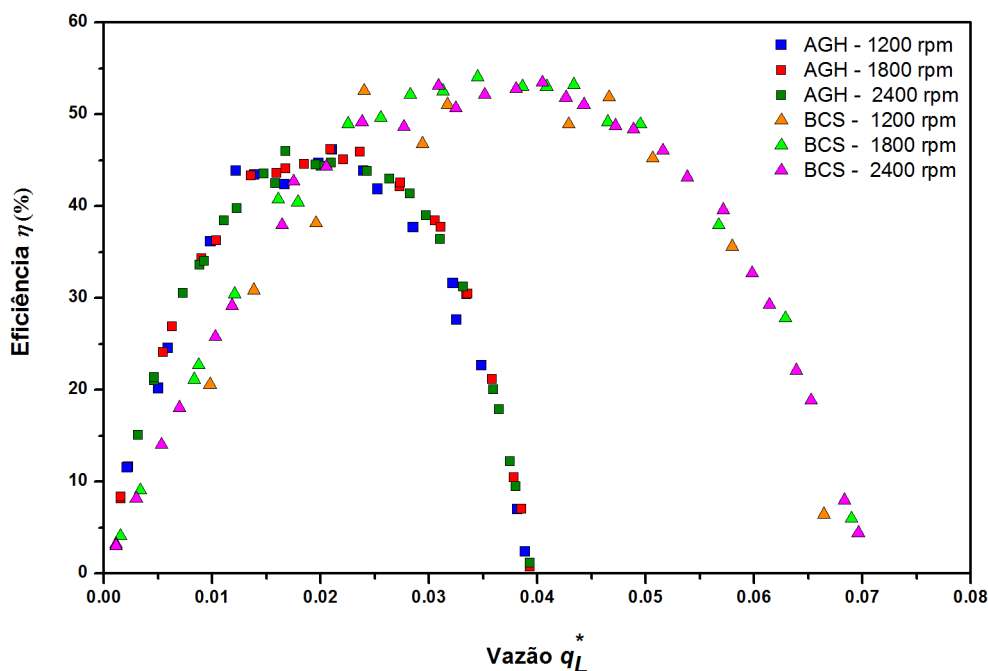


Figura 4.13 - Comparação entre AGH e GN 7000: eficiência versus coeficiente de vazão para a operação com água em diferentes velocidades de rotação.

As figuras 4.14 e 4.15 apresentam os resultados para o desempenho da BCS GN 7000 operando em série com AGH, nas velocidades de rotação de 1200 e 1800 rpm, respectivamente.

Para ambas as rotações testadas observa-se a menor vazão de operação do manuseador de gás. Na Figura 4.15 verifica-se que na vazão de aproximadamente $18 \text{ m}^3/\text{h}$ o AGH não representa nenhum aumento de pressão ao escoamento, enquanto essa vazão está próxima da vazão ótima da bomba. Portanto, quando o manuseador de gás e bomba operam em série, o manuseador de gás restringe a faixa operacional da bomba, delimitando qual será a faixa operacional do sistema. Para vazões maiores que $18 \text{ m}^3/\text{h}$ o AGH representa uma barreira para o escoamento, provocando uma queda de pressão. Ainda na Figura 4.15, após uma vazão de $24 \text{ m}^3/\text{h}$ o sistema todo começa a funcionar como uma restrição ao escoamento, sendo observada uma região de elevação negativa (curva verde). Esse resultado mostra que a perda de pressão causada pelo AGH é predominante, pois nessa região a bomba ainda gera pressão, no entanto não o suficiente para compensar a perda provoca pelo manuseador de gás.

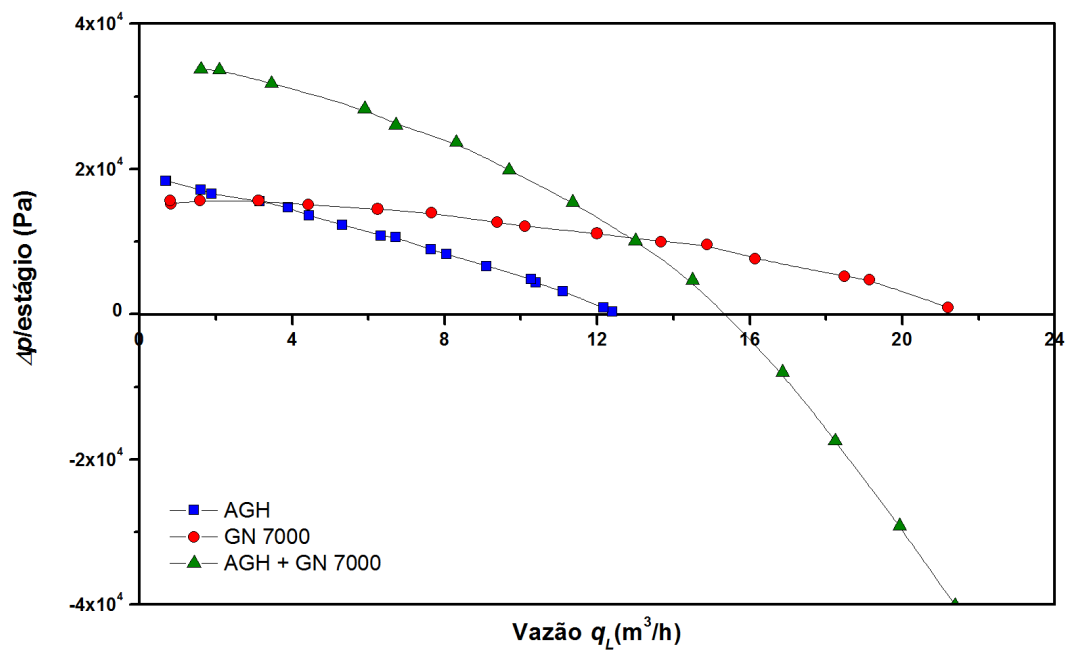


Figura 4.14 - Teste de desempenho do conjunto AGH + GN 7000 operando em série com água e rotação de 1200 rpm.

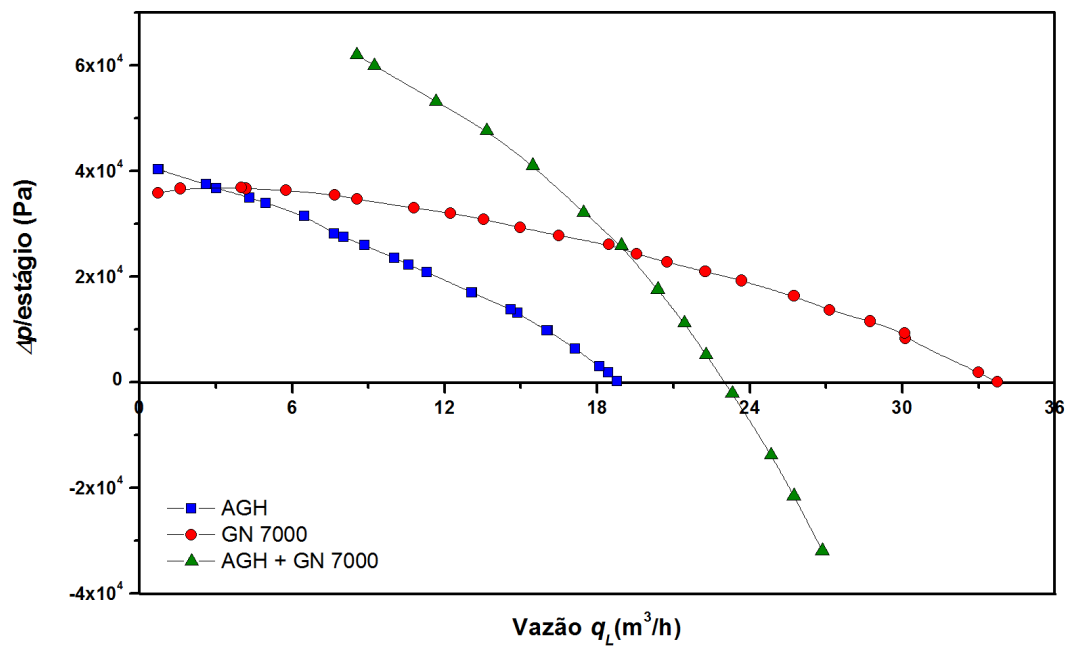


Figura 4.15 - Teste de desempenho do conjunto AGH + GN 7000 operando em série com água e rotação de 1800 rpm.

4.2 Escoamento Bifásico Água-Ar.

Essa seção apresenta os resultados de desempenho dos testes realizados com a mistura água-ar para a bomba GN 7000, AGH e também para a associação em série desses dois equipamentos. Na apresentação desses resultados serão utilizadas variáveis normalizadas. Os valores de referências para a normalização são os resultados máximos obtidos para os ensaios monofásicos. As variáveis de desempenho normalizadas são dadas por:

$$\Delta p_n = \frac{p_s - p_e}{\Delta p_{max}} \quad (4.1)$$

$$q_n = \frac{q}{q_{max}} \quad (4.2)$$

$$P_{m,n} = \frac{P_m}{P_{m,max}} \quad (4.3)$$

$$\eta_n = \frac{\eta}{\eta_{max}} \quad (4.4)$$

onde Δp_{max} é máxima diferença de pressão gerada pela bomba (ou manuseador de gás) operando somente com água em determinada velocidade de rotação; q_{max} é máxima vazão de líquido; $P_{m,n}$ é a máxima potência consumida pela bomba operando com água e η_{max} é a eficiência máxima de operação em determinada velocidade de rotação.

Essas variáveis normalizadas são apresentadas em relação ao número de estágios de cada equipamento, representando assim um estágio médio onde cada estágio teria o mesmo desempenho. Para bombas de BCS de múltiplos estágios operando apenas com líquido o desempenho de cada estágio é bastante similar aos demais, no entanto quando a bomba opera na presença de gás, cada estágio apresenta desempenho distinto dos demais (Pessoa, 2001). Portanto, embora os resultados sejam apresentados por estágio, a quantidade de estágios possui influência no desempenho dos equipamentos.

4.2.1 Efeitos da presença de gás no desempenho da bomba GN 7000.

As Figuras 4.16 a 4.18 mostram os efeitos da presença de gás no desempenho da bomba GN 7000. Esses resultados referem-se à operação da bomba na velocidade de rotação de 2400 rpm, pressão manométrica de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0 e 10%. Conforme mostrado na Figura 4.16, o aumento da fração volumétrica de gás, além de degradar o desempenho da bomba, introduz instabilidades na curva de desempenho. O ponto de máximo dessas curvas representa o fenômeno de *surging*. Observa-se a ocorrência do *surging* mesmo para baixas frações de vazio, quando a vazão e a rotação são suficientemente baixas. Nessas condições, as bolhas tendem a coalescer e formar bolsões de gás, causando bloqueio parcial do rotor (Estevam, 2002).

A degradação do desempenho é bastante acentuada devido à presença de gás. Para uma vazão de 0,4, observa-se que a capacidade de gerar pressão da bomba se reduz de aproximadamente 0,8 para 0,4, nas frações de gás de 4 e 10%, respectivamente. Portanto, uma redução de 50% na capacidade de bombeamento devido ao aumento de 6% na fração volumétrica de gás.

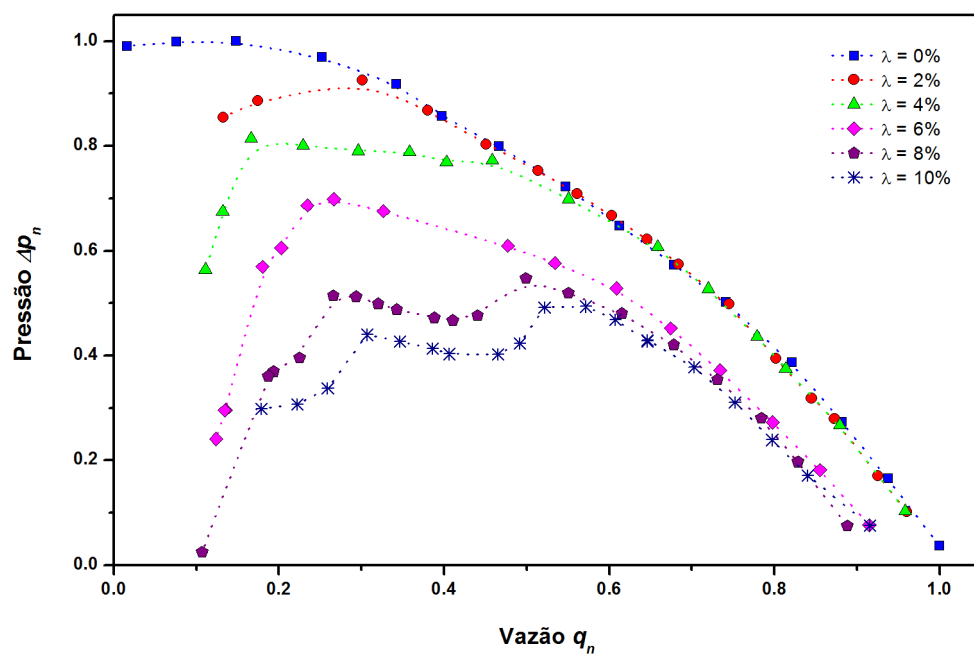


Figura 4.16 - Incremento de pressão gerado pela bomba GN 7000 operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 2400 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.

Os testes realizados permitiram trabalhar com frações de gás de 10% apenas, enquanto em aplicações na indústria têm sido possível operar BCSs com frações de gás de 30%, porém a pressões de entrada bem mais elevadas. A baixa pressão de sucção utilizada no presente trabalho faz com que, a uma dada fração de vazio, as bolhas formadas tenham diâmetro muito maior do que teriam a alta pressão. Por outro lado, é possível também que a orientação horizontal da bomba esteja favorecendo o acúmulo de bolhas no topo da mesma e antecipando a ocorrência do *surging*.

As Figuras 4.17 e 4.18 mostram os efeitos da presença de gás na potência consumida e na eficiência da bomba, respectivamente. Conforme observado nesses resultados, em geral a potência consumida pela bomba diminui devido o aumento da fração volumétrica de gás. A eficiência da bomba possui essa mesma tendência, onde quanto maior a fração de gás menor será sua eficiência. A presença do gás prejudica o processo de transferência de energia do rotor para o fluido, pois todas as interações são de origem dinâmica e a baixa massa específica do gás reduz a energia cinética transferida à mistura.

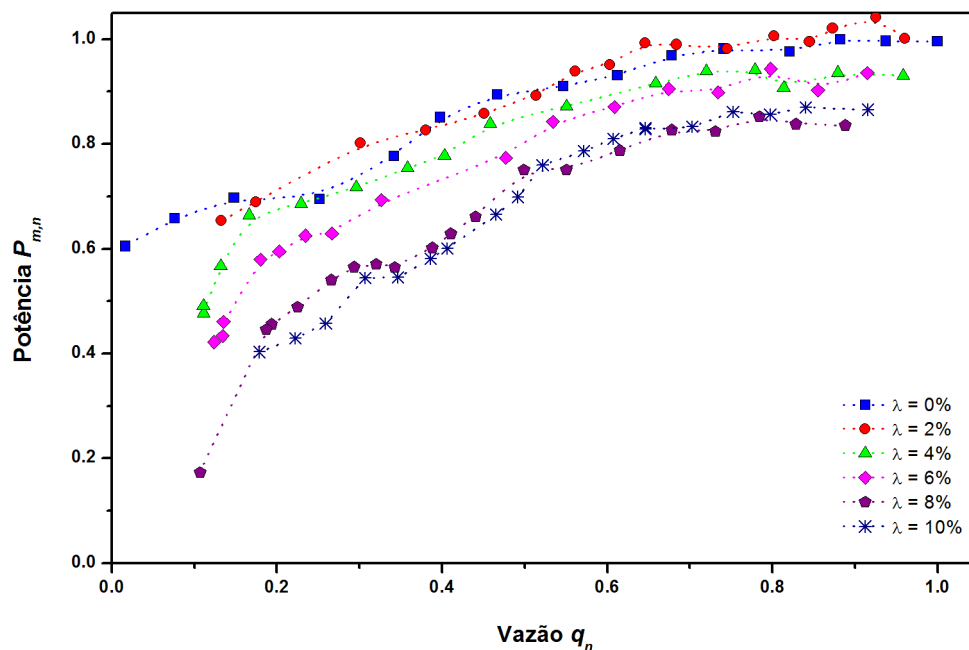


Figura 4.17 - Potência consumida pela bomba GN 7000 operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 2400 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.

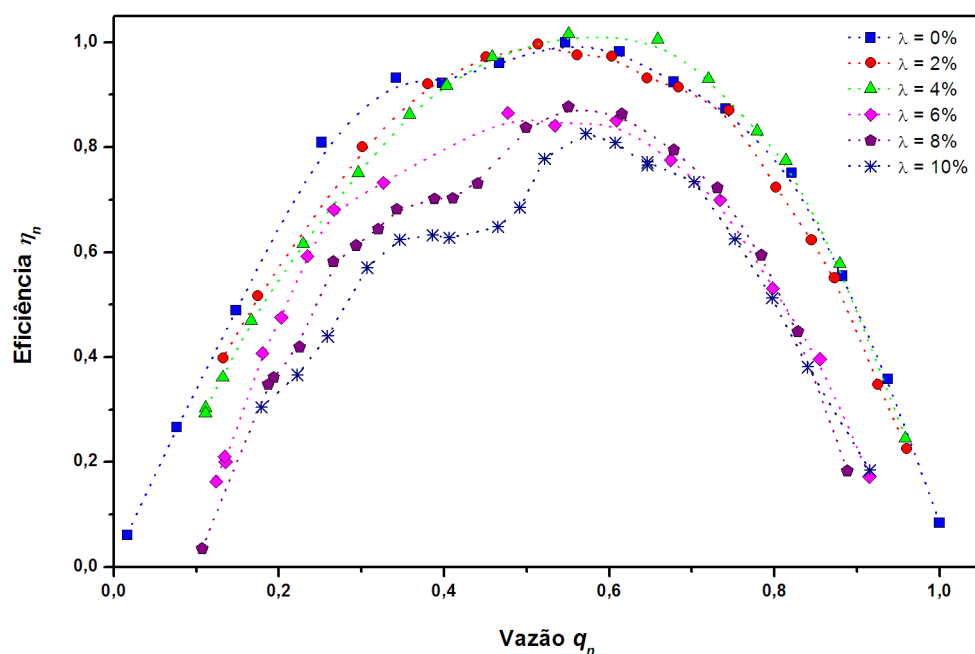


Figura 4.18 - Eficiência da bomba GN 7000 operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 2400 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.

Com o objetivo de investigar os efeitos da rotação no desempenho da bomba operando na presença de gás, foram realizados teste nas velocidades de rotação de 1200 e 1800 rpm. As Figuras 4.19 a 4.22 apresentam esses resultados.

Conforme mostrado nessas figuras os mesmos fenômenos citados para a rotação de 2400 rpm também ocorrem para rotações menores. No entanto, a menor velocidade de rotação influencia as condições operacionais em que o *surging* ocorre. A redução da velocidade de rotação faz que o *surging* aconteça em vazões maiores. Comparando esses resultados nas diferentes rotações observa-se que para uma fração volumétrica de gás de 6% e rotação de 2400 rpm, o *surging* ocorre a uma vazão em torno de 0,25, enquanto para as rotações de 1800 e 1200 rpm, essa vazão de ocorrência de *surging* aumenta para 0,4 e 0,6, respectivamente. Portanto, a diminuição da rotação desloca o ponto de *surging* para o lado direito da curva de desempenho, reduzindo a faixa operacional estável da bomba.

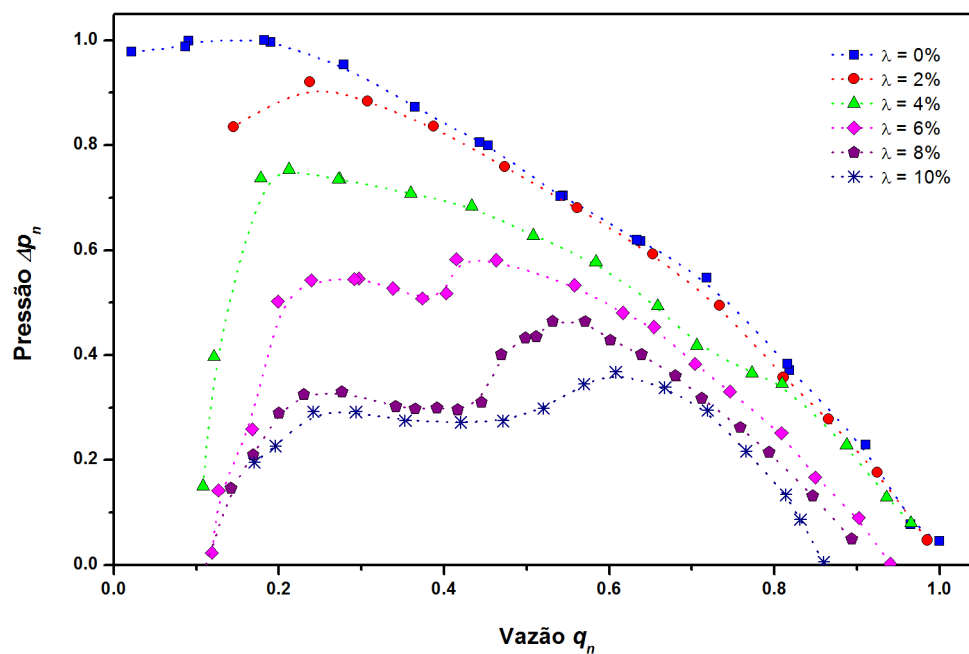


Figura 4.19 - Incremento de pressão gerado pela bomba GN 7000 operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 1800 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.

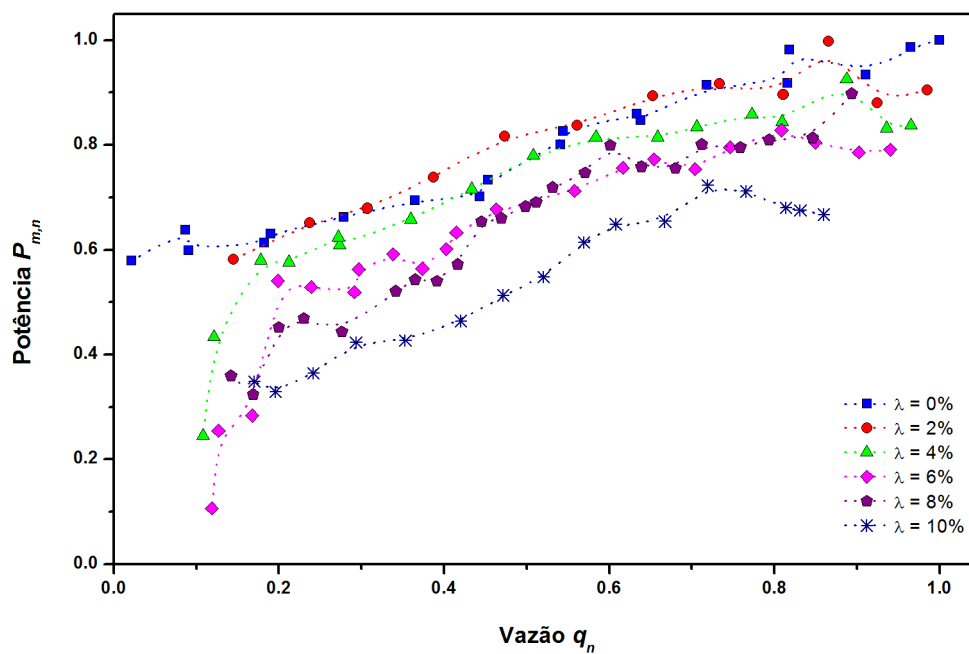


Figura 4.20 - Potência consumida pela bomba GN 7000 operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 1800 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.

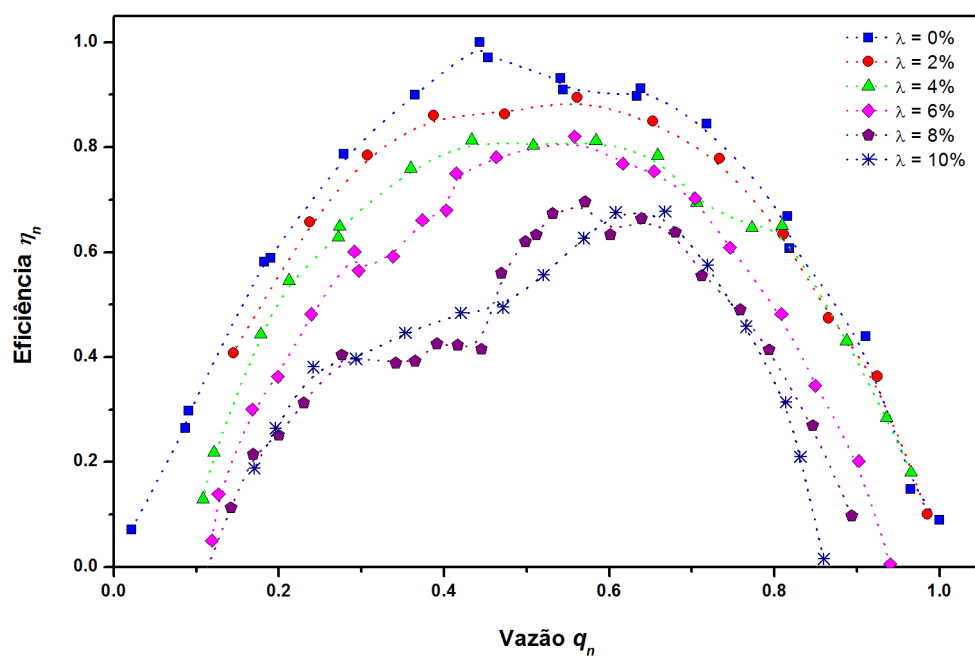


Figura 4.21 - Eficiência da bomba GN 7000 operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 1200 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.

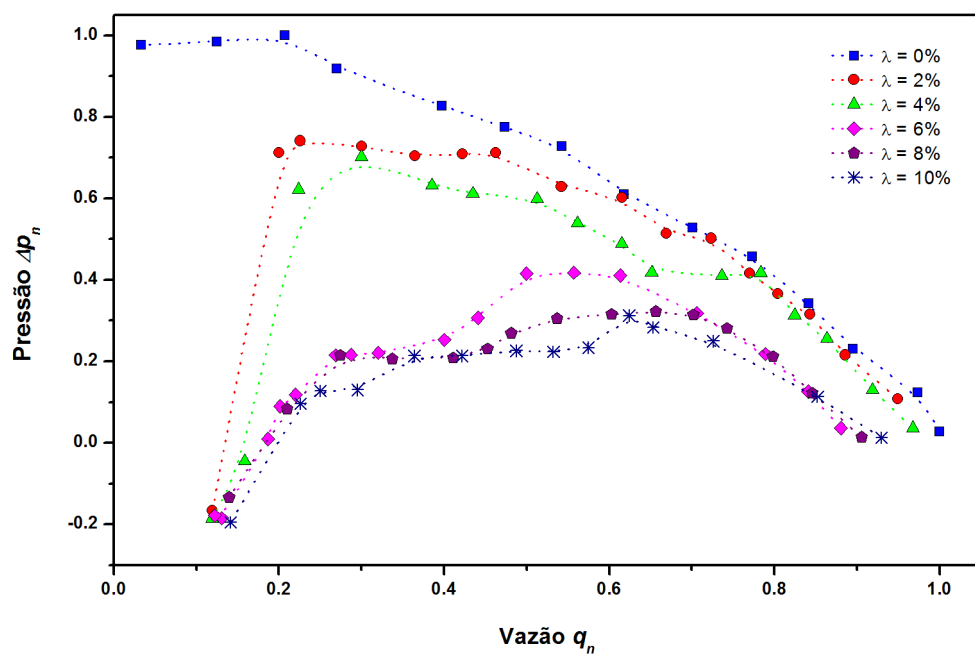


Figura 4.22 - Incremento de pressão gerado pela bomba GN 7000 operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 1200 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.

4.2.2 Efeitos da velocidade de rotação no desempenho da bomba GN 7000.

Os efeitos da velocidade de rotação na ocorrência do *surging* são mostrados a seguir.

A Figura 4.23 apresenta o diferencial de pressão através da bomba no ponto de *surging* para diferentes rotações e frações de gás variando de 4 a 10% de gás. Esses resultados mostram o aumento do diferencial de pressão gerado no ponto de *surging* conforme é aumentada a velocidade de rotação.

A Figura 4.24 mostra a vazão no ponto de *surging* em função da fração volumétrica de gás. O aumento da rotação faz com que esse fenômeno ocorra em vazões menores, aumentando a tolerância da bomba à presença de gás. O gráfico da Figura 4.24 serve como um mapa de estabilidade de operação da bomba. Para uma determinada vazão de operação é conhecida a fração volumétrica em que irá ocorrer o *surging*. Em frações menos que a do *surging*, a operação da bomba é estável. Para frações maiores a operação é instável.

O aumento da velocidade de rotação intensifica o campo centrífugo no interior da bomba, aumentando assim a tendência de segregação das fases nos canais do rotor. No entanto, conforme observado nos resultados, o aumento da velocidade de rotação é benéfico para o funcionamento da bomba. O aumento da rotação também aumenta a velocidade da mistura e consequentemente a turbulência. A turbulência por sua vez construiu para a diminuição do diâmetro de bolha, dificultando a segregação das fases. Portanto, o efeito da turbulência é aparentemente predominante em relação aos efeitos do aumento do campo centrífugo.

As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam as curvas de desempenho da bomba GN 7000 operando em diferentes velocidades de rotações para frações de gás de 6 e 10%, respectivamente. Analisando os resultados de ambos os gráficos fica evidenciado o efeito da rotação no desempenho da bomba. Além de mudanças nas formas das curvas, observa-se também uma melhora significativa no desempenho da bomba devido ao aumento da velocidade de rotação.

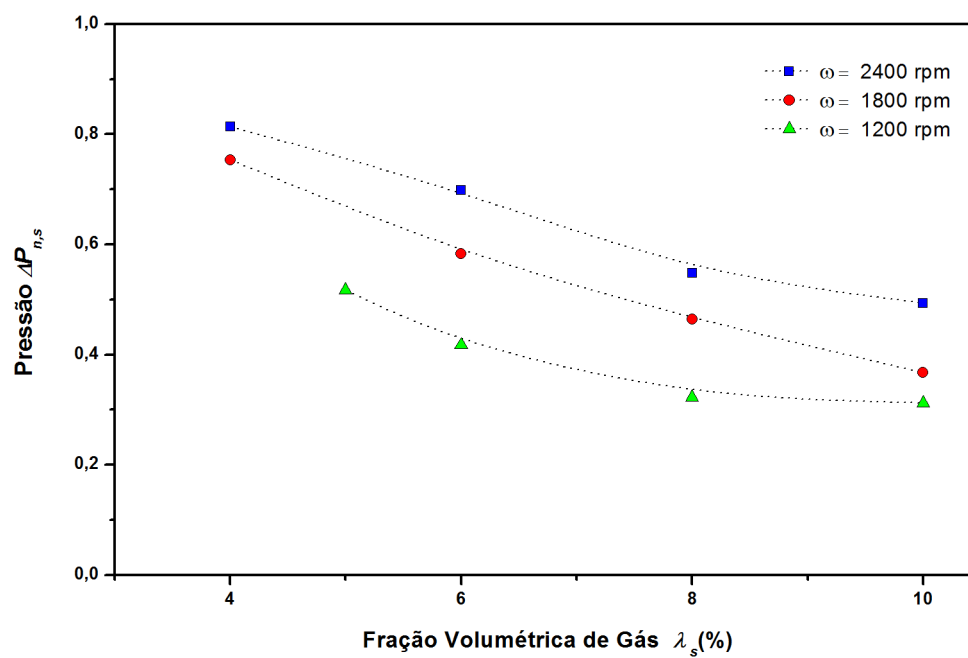


Figura 4.23 - Incremento de pressão no ponto de surging para pressão de entrada de 50 kPa e rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm.

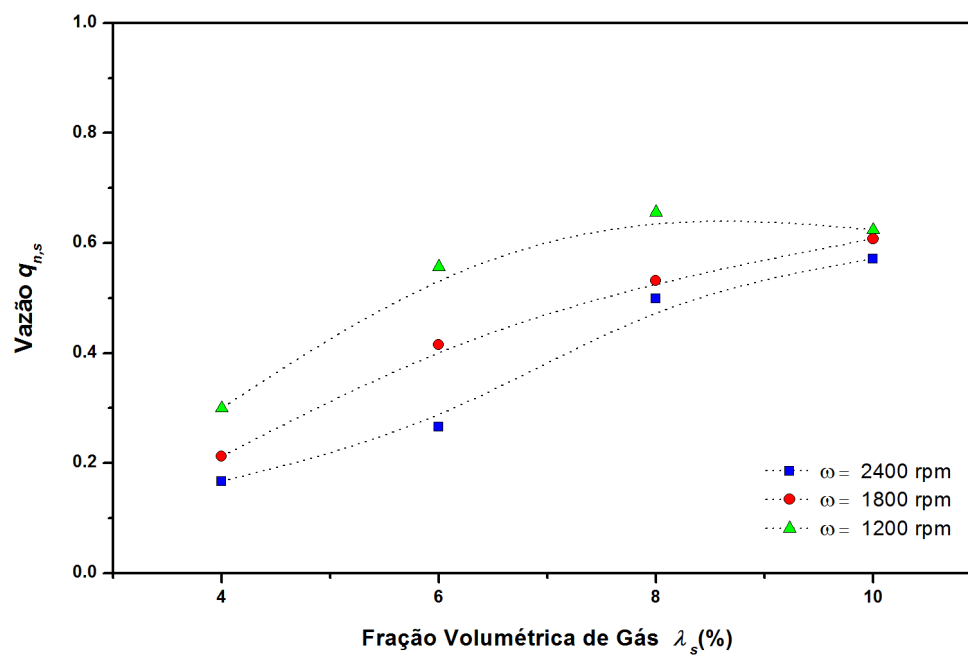


Figura 4.24 - Vazão no ponto de surging para pressão de entrada de 50 kPa e rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm.

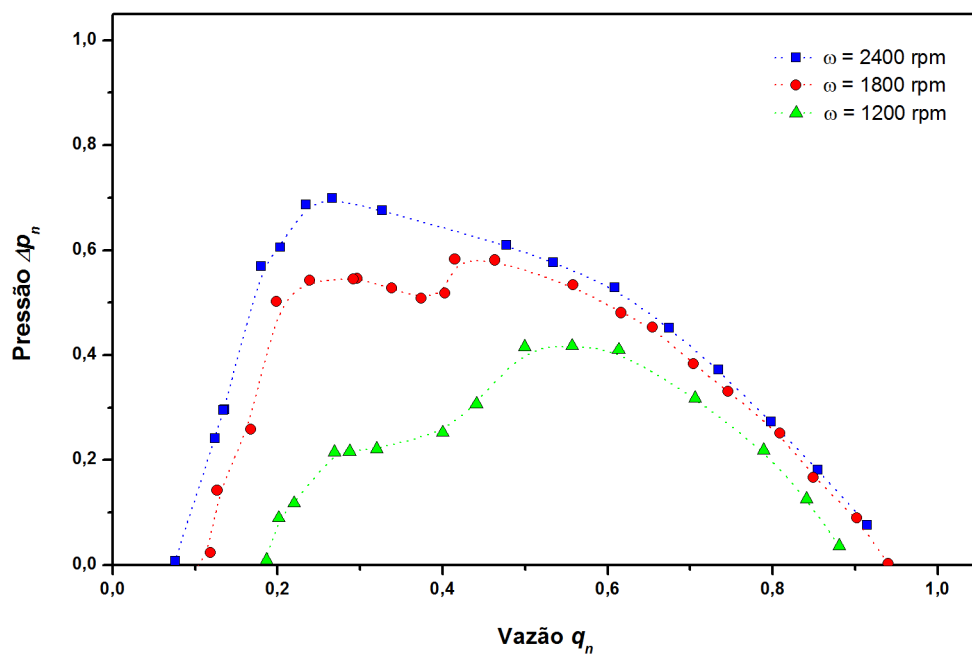


Figura 4.25 - Efeito da rotação: BCS GN 7000 operando com a mistura água-ar nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e fração volumétrica de gás de 6%.

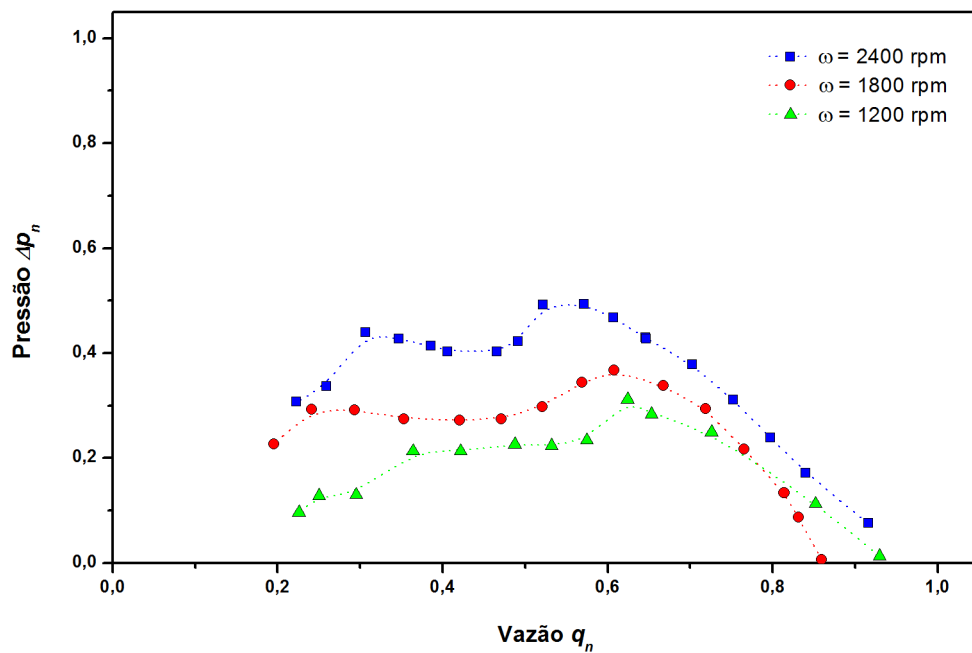


Figura 4.26 - Efeito da rotação: BCS GN 7000 operando com a mistura água-ar nas rotações de 1200, 1800 e 2400 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e fração volumétrica de gás de 10%.

4.2.3 Efeitos da pressão de sucção no desempenho da bomba GN 7000.

Buscando investigar o efeito da pressão de entrada no desempenho da bomba GN 7000, alguns testes foram realizados variando-se esse parâmetro. No entanto, devido as limitações da carcaça em acrílico não foi possível testar pressões manométricas maiores que 200 kPa. Esses ensaios foram realizados na rotação de 1800 rpm, frações de gás, 6 e 10% e pressões de 50, 100 e 200 kPa. As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam esses resultados.

Analisando esses resultados é possível observar uma tendência de aumento de desempenho devido ao incremento da pressão de sucção. Para a bomba operando com a fração volumétrica de gás de 10%, Figura 4.28, essa tendência é mais pronunciada, onde as curvas de desempenho sofrem um significativo deslocamento devido à alteração da pressão de sucção. Possivelmente a pressão de sucção atua no diâmetro das bolhas na entrada da bomba. Com a elevação da pressão o diâmetro das bolhas se reduz dificultando sua coalescência.

Embora o aumento da pressão de sucção se mostre apropriado para aumentar a tolerância da bomba à presença de gás, nem sempre é possível sua aplicação em campo. O aumento da pressão de sucção da bomba diminui o diferencial de pressão entre o poço e o reservatório, prejudicando a produtividade. Portanto, algo indesejado.

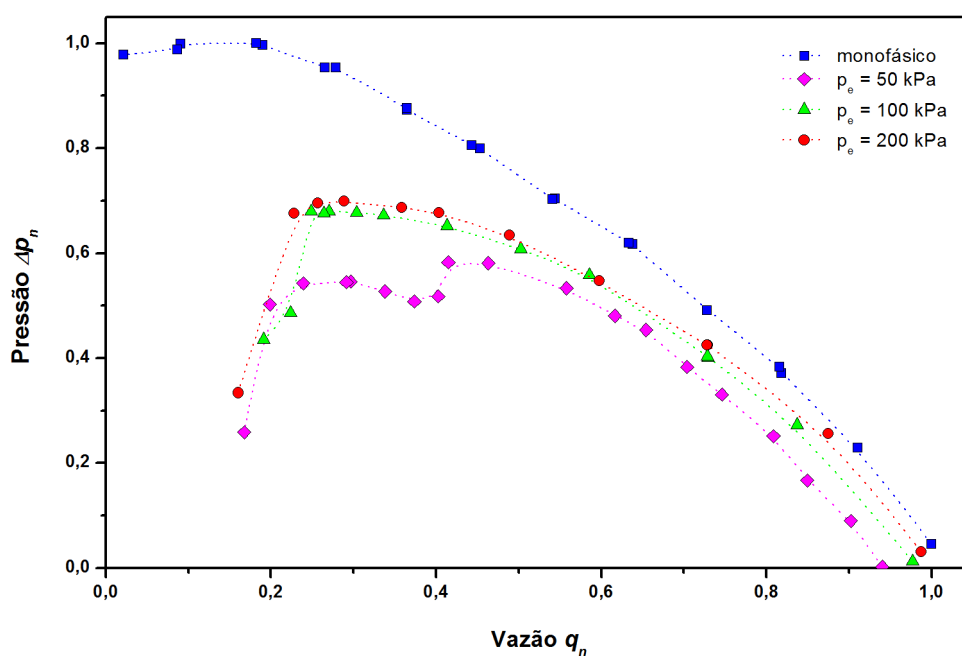


Figura 4.27 - Efeito da pressão no desempenho da bomba GN 7000 operando a 1800 rpm e 6% de fração volumétrica de gás.

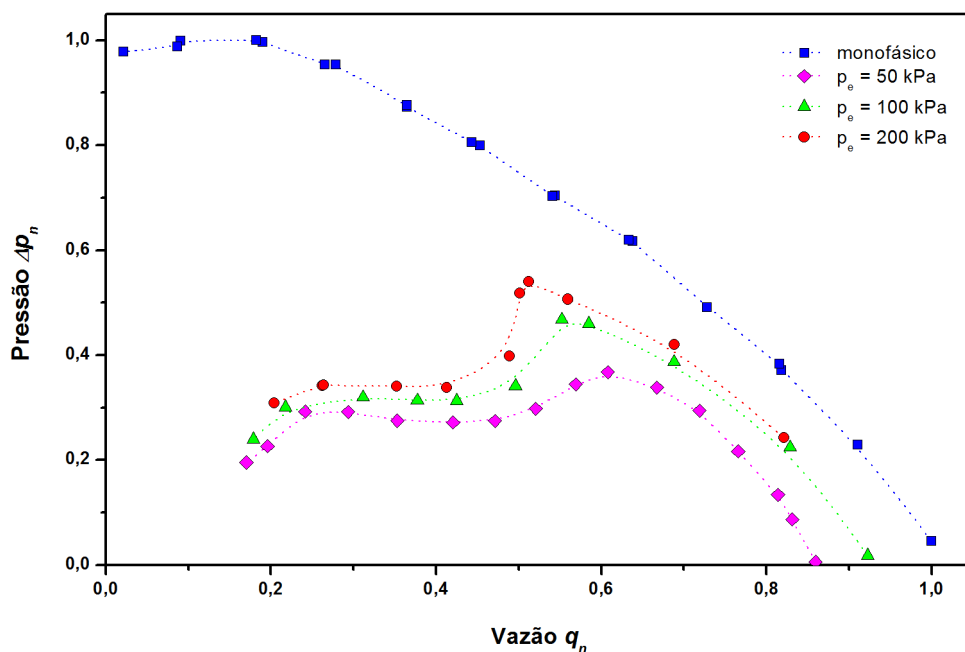
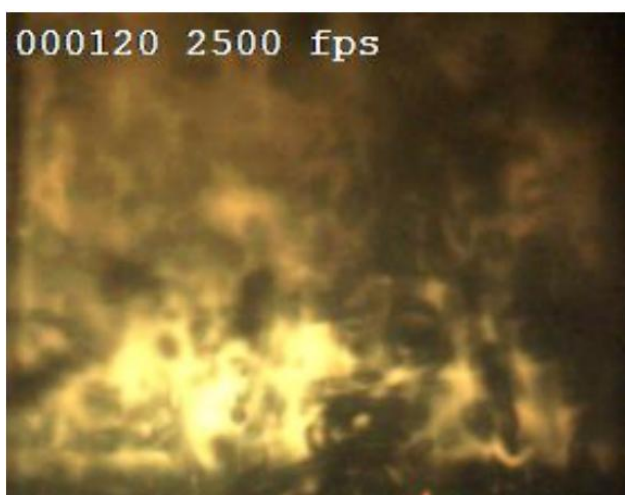


Figura 4.28 - Efeito da pressão no desempenho da bomba GN 7000 operando a 1800 rpm e 10% de fração volumétrica de gás.

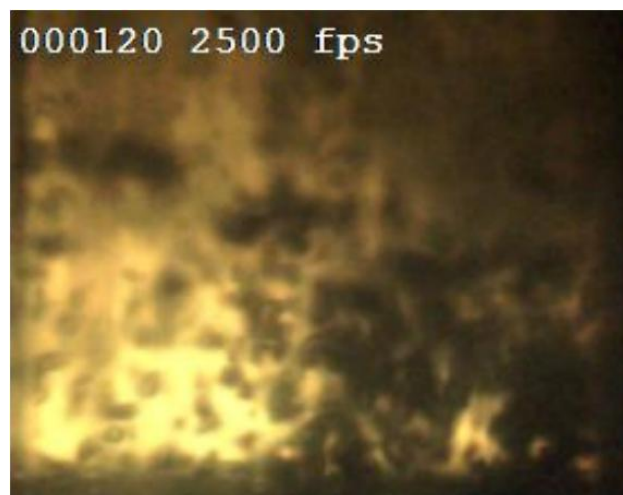
Um dos objetivos iniciais deste trabalho era correlacionar o desempenho da bomba com diâmetro de bolha. Dessa forma, seria possível avaliar qual a influência dos diferentes parâmetros operacionais no diâmetro de bolha e consequentemente no desempenho da bomba. No entanto, nos testes realizados a 1200, 1800 e 2400 rpm a visualização do escoamento foi bastante prejudicada devido à grande população de bolhas presente no escoamento. Para o ponto de tomada de imagens localizado na entrada da bomba, a menor população de bolhas foi obtida nos testes a velocidade de rotação de 1200 rpm e 1% de fração de ar. Ainda assim, houve a necessidade de reduzir a rotação e a fração de gás para que a visualização por meio de filmagem rápida fosse possível.

A Figura 4.29 apresenta as imagens obtidas com a câmera de alta velocidade na entrada da bomba GN 7000 para baixas frações de gás. As imagens foram obtidas a uma taxa de 2500 quadros/s.

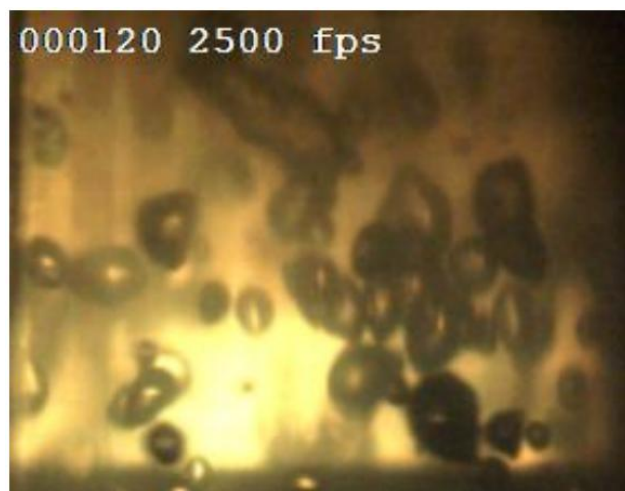
Embora a redução da rotação e da fração de gás viabilizassem a visualização, Figuras 4.29-c e 4.29-d, a condição operacional se mostrou bastante instável, ocorrendo a segregação do escoamento e retorno de gás pela linha de líquido. Essas instabilidades impossibilitaram a realização dos testes de desempenho nessas condições operacionais.



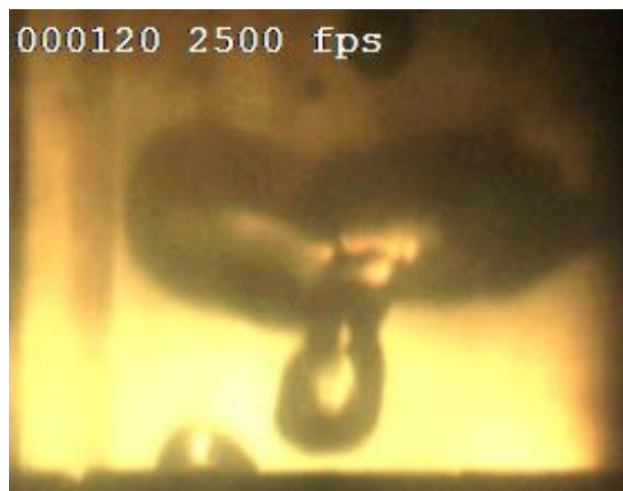
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.29 - Imagens do escoamento bifásico água-ar na entrada da bomba GN 7000: (a) 1800 rpm e 1% de ar; (b) 1200 rpm e 1% de ar; (c) 900 rpm e 0,25% de ar e (d) 600 rpm e 0,25% de ar.

4.2.4 Efeitos da presença de gás no desempenho do manuseador de gás (AGH).

O desempenho do manuseador de gás também foi testado operando com a mistura água-ar. Os testes de desempenho foram realizados para a pressão manométrica de sucção de 50 kPa, velocidades de rotação de 1800 e 2400 rpm e diferentes frações volumétricas de gás. Os resultados desses testes para a rotação de 2400 rpm são mostrados nas Figuras 4.30 a 4.32. Para a rotação de 1800 rpm os resultados são apresentados nas Figuras 4.33 a 4.35.

Analisando o gráfico da Figura 4.30 observa-se que, além da queda de desempenho, há o fenômeno de *surging* na operação do manuseador de gás. Entretanto, esse ponto de *surging* é mais suavizado quando comparado com a operação da bomba GN 7000.

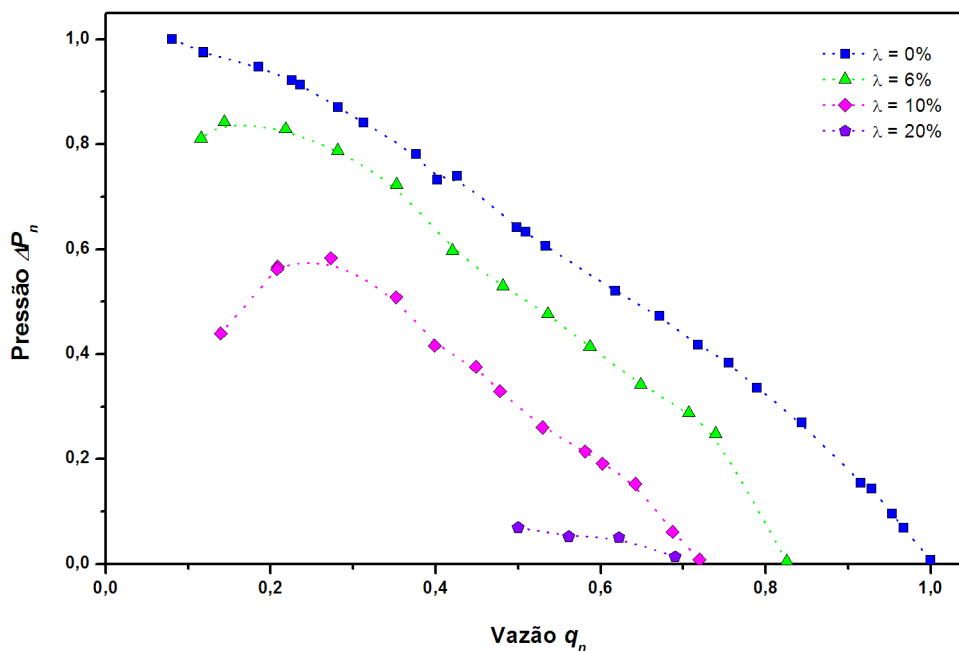


Figura 4.30 - Incremento de pressão gerado pela bomba AGH operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 2400 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-20%.

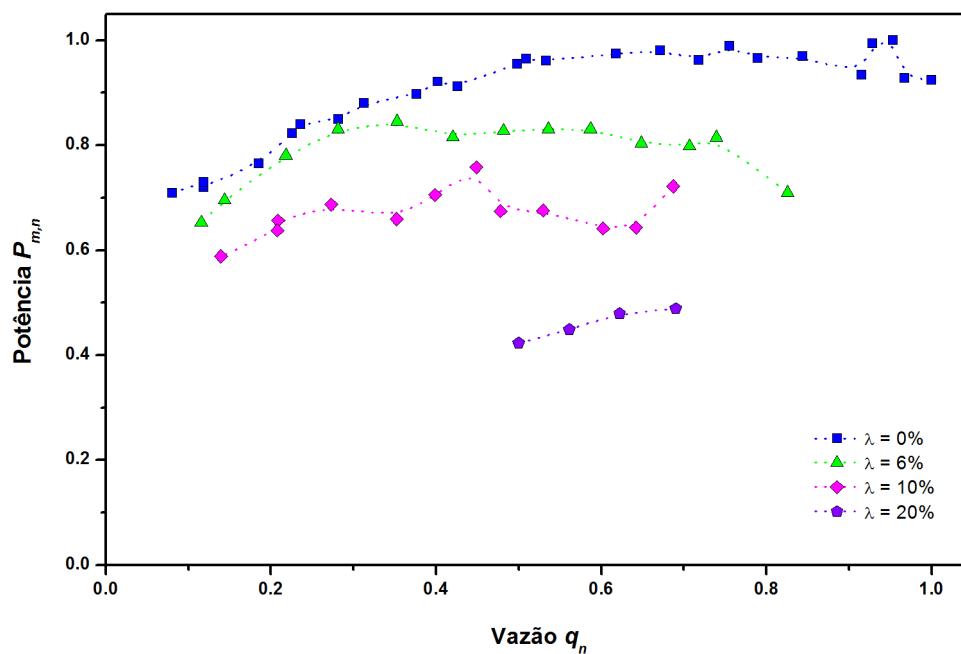


Figura 4.31 - Potência consumida pela AGH operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 2400 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-20%.

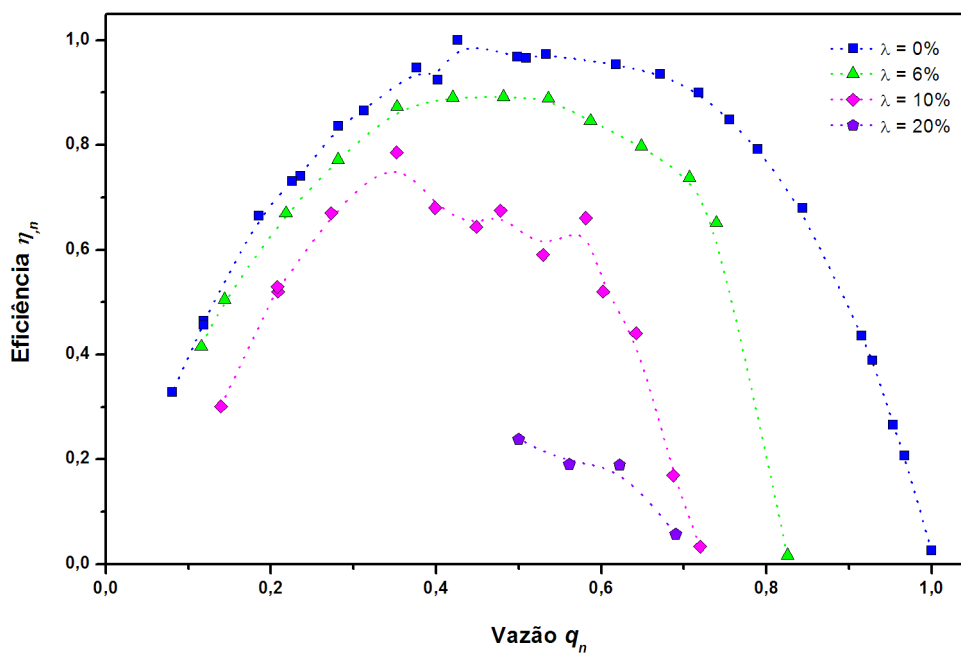


Figura 4.32 - Eficiência do AGH operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 2400 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-20%.

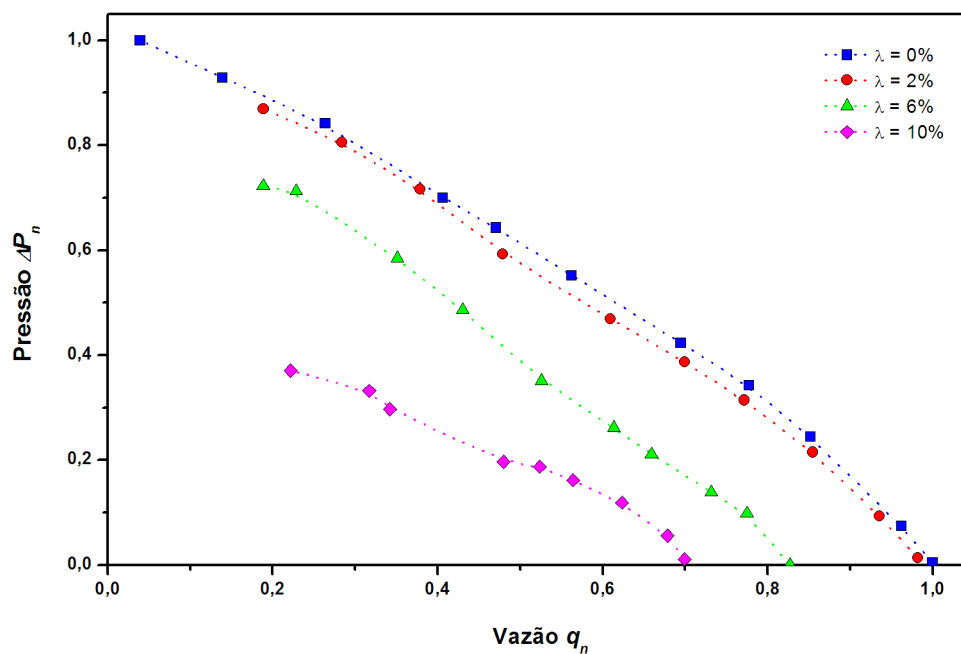


Figura 4.33 - Incremento de pressão gerado pela bomba AGH operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 1800 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.

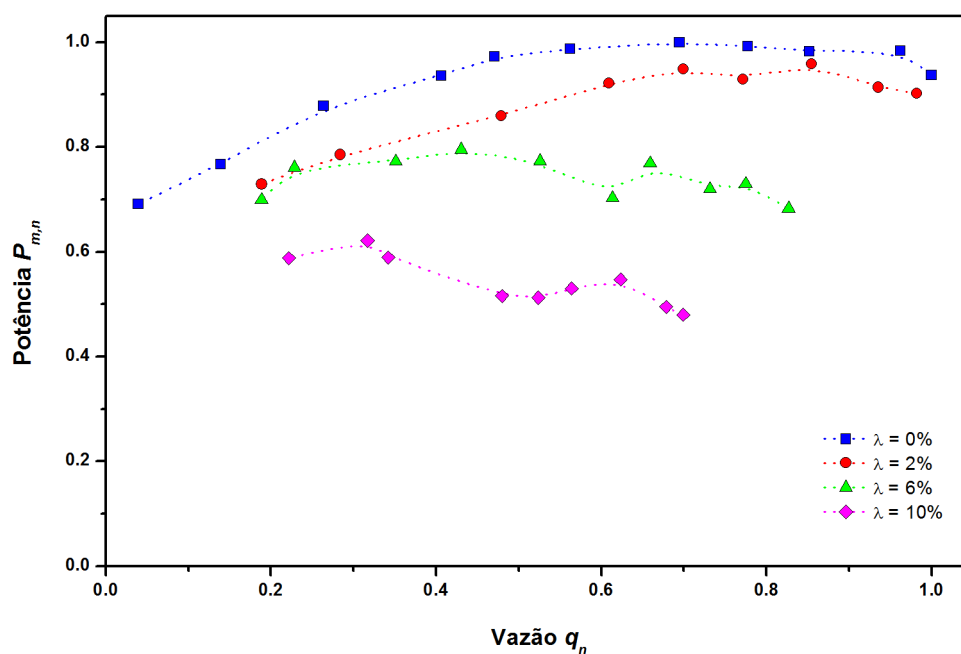


Figura 4.34 - Potência consumida pela AGH operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 1800 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.

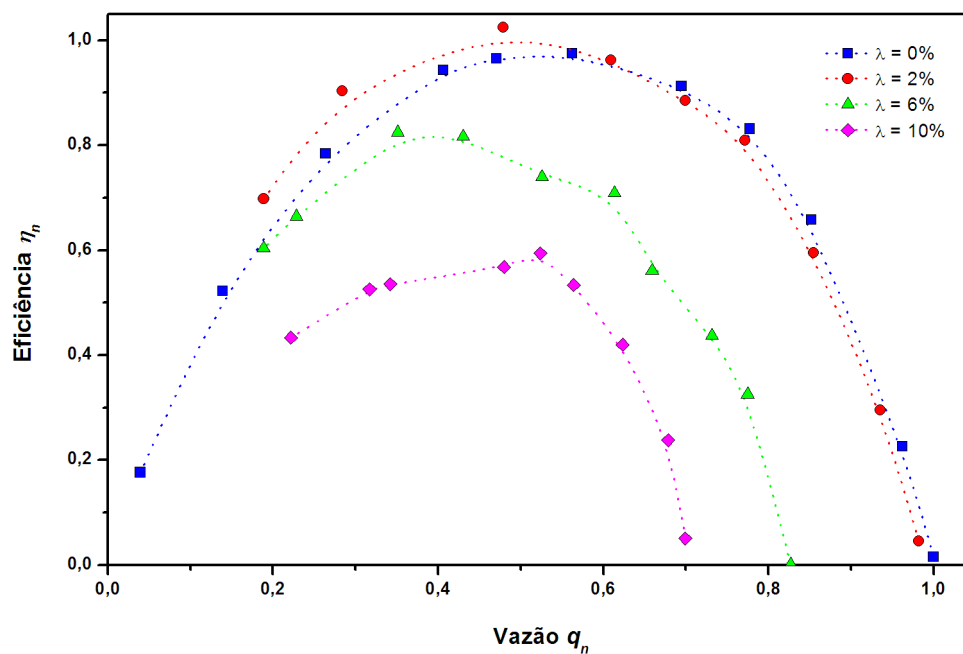


Figura 4.35 - Eficiência do AGH operando com a mistura água-ar, velocidade de rotação de 1800 rpm, pressão de sucção de 50 kPa e frações volumétricas de gás variando entre 0-10%.

Os testes de desempenho do AGH também foram realizados para diferentes pressões de sucção. A Figura 4.36 ilustra o desempenho desse equipamento operando com 10% de ar, velocidade de rotação de 1800 rpm e pressões variando entre 50 e 300 kPa. Esses resultados mostram a tendência de um melhor desempenho da bomba em função do aumento da pressão de sucção. Nota-se que para as curvas apresentada não ocorre o fenômeno de surging.

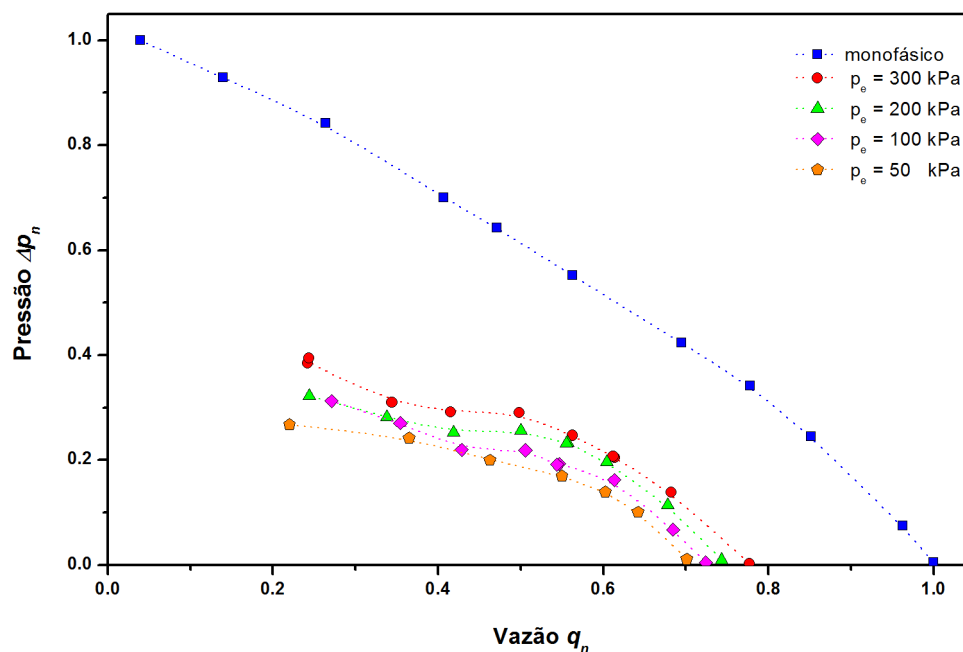


Figura 4.36 - Efeito da pressão no desempenho AGH operando a 1800 rpm e 10% de fração volumétrica de gás.

4.2.5 Desempenho do conjunto AGH + BCS.

O AGH é um equipamento desenvolvido e utilizado para melhorar o desempenho da BCS na presença de gás. Portanto, esse equipamento é utilizado em série com a BCS sendo instalado a montante. Objetivando testar a efetividade de operação do manuseador de gás alguns testes foram realizados com o conjunto AGH + BCS.

Devido à reduzida capacidade dos equipamentos de suportarem pressão, os testes foram realizados nas pressões de sucção de 50, 100 e 200 kPa. As Figuras 4.37 a 4.39 apresentam esses resultados. Analisando essas figuras conclui-se que para as condições operacionais testados o manuseador de gás não promove nenhuma melhora no desempenho da BCS. As curvas de desempenho tanto para BCS operando sozinha, quanto para operando em conjunto com o AGH são praticamente as mesmas.

Portanto, diferente dos resultados obtidos por Melvin *et al* (1998), Romero (1999) e Woon (1997), neste trabalho não se observa um desempenho adequado para o equipamento testado. É possível que a faixa operacional onde o AGH foi testado não tenha favorecido seu

funcionamento. A baixa pressão utilizada nos testes pode não ser suficiente para que o mecanismo de atuação desse equipamento seja eficiente. Devido às limitações de teste já citadas, não é possível verificar se o AGH efetivamente melhora o desempenho da BCS em outras condições de pressão de frações de gás.

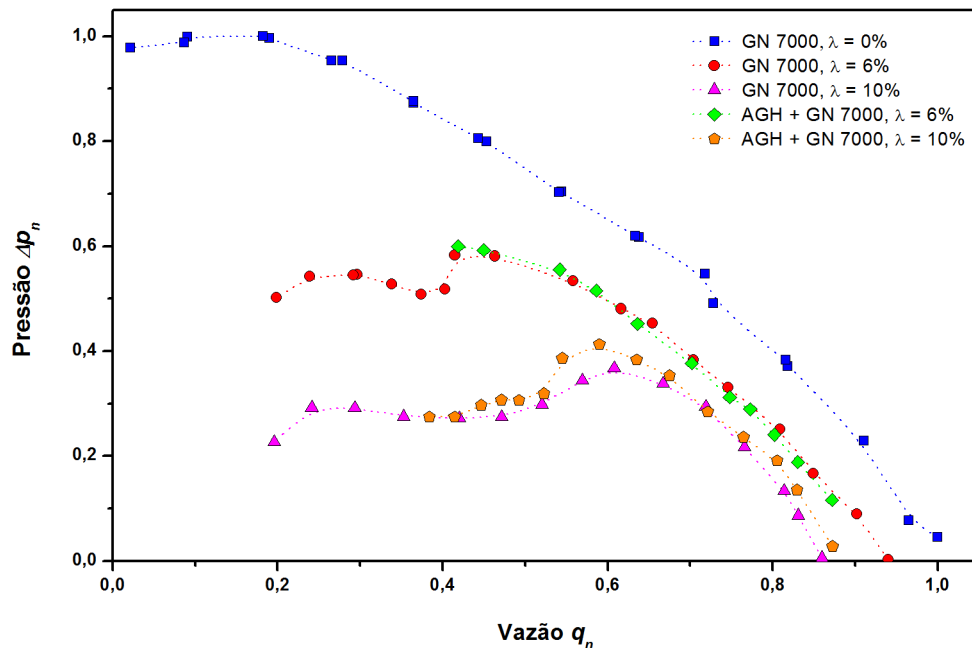


Figura 4.37 - Desempenho do conjunto AGH + GN 7000, operando a 1800 rpm, pressão de sucção de 50 kPa, e frações de gás de 6 e 10%.

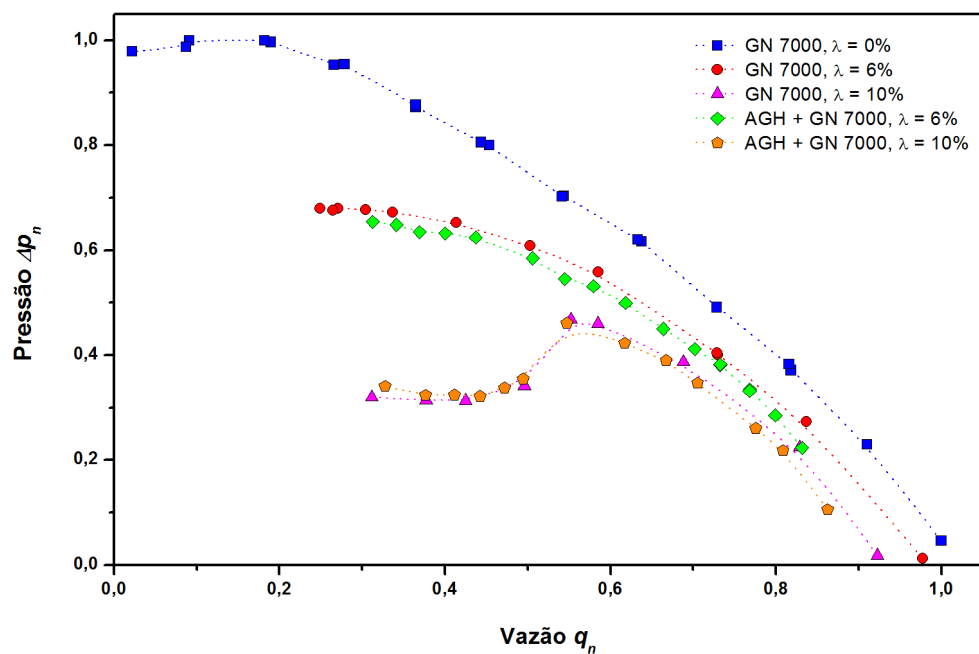


Figura 4.38 - Desempenho do conjunto AGH + GN 7000, operando a 1800 rpm, pressão de sucção de 100 kPa, e frações de gás de 6 e 10%.

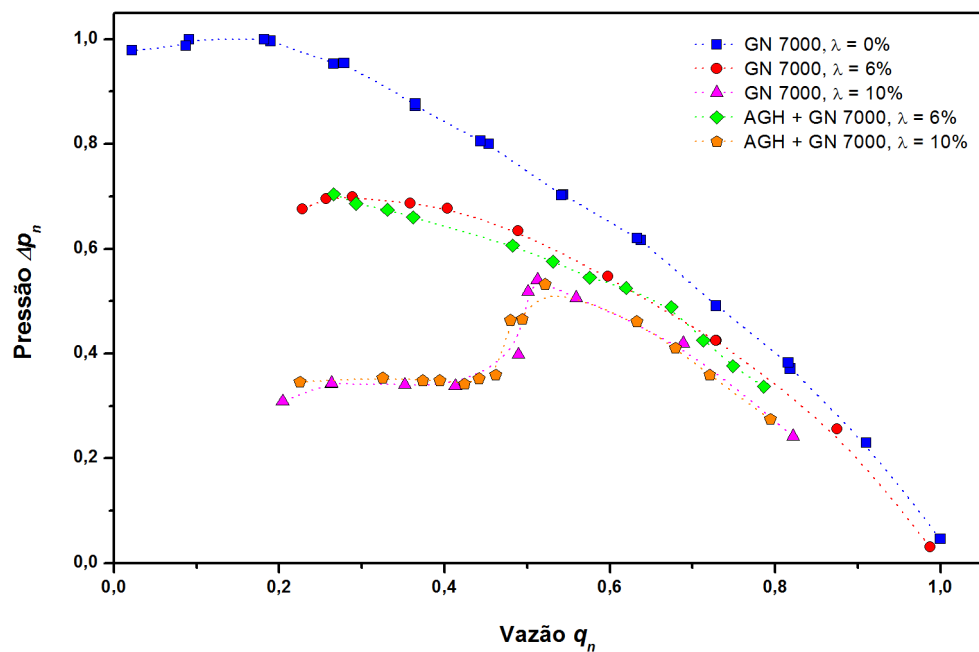


Figura 4.39 – Desempenho do conjunto AGH + GN 7000, operando a 1800 rpm, pressão de sucção de 200 kPa, e frações de gás de 6 e 10%.

5 CONCLUSÕES

Em relação ao presente trabalho obtêm-se as seguintes conclusões:

1. Dos objetivos propostos inicialmente apenas a identificação dos padrões de escoamento na estrada na bomba não foi realizada com sucesso. Esse objetivo não foi concluído devido às dificuldades operacionais encontradas. Para tornar possível a visualização do escoamento observou-se ser necessária uma acentuada redução da vazão e fração de gás. Nessas condições operacionais a posição horizontal prejudicou a realização da visualização devido a estratificação do escoamento no interior da bomba. Trevisan (2010) conseguiu identificar os padrões de escoamento na sucção da bomba para fração de gás menos que 1% e rotações inferiores a 900 rpm. As condições operacionais utilizadas por Trevisan (2010) corroboram a necessidade de condições operacionais mais baixas e, portanto a utilização de um skid de testes vertical, evitando assim a estratificação do escoamento no interior da bomba.
2. Os demais objetivos iniciais do trabalho foram alcançados com sucesso. Os resultados experimentais obtidos permitem avaliar a influência de diferentes variáveis operacionais no desempenho da BCS e do AGH, tais como velocidade de rotação, vazões de gás e líquido e pressão de sucção.
3. Os testes da BCS e do AGH operando com água mostraram boa repetitividade e satisfizeram plenamente as leis de semelhança.
4. A velocidade de rotação e a pressão de sucção afetam a fração volumétrica de *surging*. O aumento da velocidade de rotação faz com que o *surging* para frações de gás maiores. De maneira semelhante, o aumento da pressão de sucção resulta em uma maior capacidade de a bomba operar na presença de gás, estendendo sua faixa operacional.
5. Nas condições operacionais testadas o manuseador de gás mostrou-se ineficiente, não fornecendo nenhuma melhoria no desempenho da BCS.

Baseados nas conclusões citadas anteriormente são sugeridos algumas recomendações para trabalhos futuros.

1. Desenvolver um skid que opere em diferentes inclinações possibilitando analisar a influência dos efeitos gravitacionais no padrão de escoamento no rotor.
2. Melhorar o processo de visualização de escoamento com grande populações de bolhas.
3. Estender a matriz experimental abrangendo condições experimentais ainda não testadas.
4. Realizar teste de desempenho de BCS operando com fluido viscoso na presença de gás.
5. Verificar o efeito do diâmetro de bolha no desempenho da bomba através do controle dessa variável.
6. Automatizar o acionamento das válvulas de controle de fluxo facilitando a realização dos testes.
7. Para o teste de eficiência do manuseador de gás, recomenda-se que seja realizada a comparação entre o equipamento com os estágios convencionais e o mesmo equipamento com os estágios perfurados. Dessa forma, acredita-se ser possível uma melhor avaliação do mecanismo de funcionamento do AGH.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amaral, G. D. L., 2007, “Modelagem do Escoamento Monofásico em Bomba Centrífuga Submersa Operando com Fluidos Viscosos”. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 233 p. Dissertação (Mestrado).

Barrios, L. J., 2007, “Visualization and Modeling of Multiphase Performance Inside an Electrical Submersible Pump” Ph.D. Dissertation, Petroleum Engineering Department, University of Tulsa.

Brill, J. P., Mukherjee, H., 1999, “Multi Phase Flow in Wells”. First Edition, Society of Petroleum Engineers, Texas.

Cirilo, R., 1998, “Air-Water Flow Through Electrical Submersible Pumps”, M. S. Thesis, Petroleum Engineering Department, University of Tulsa.

Dunbar, C. E., 1989, “Determination of Proper Type of Gas Separator,” paper presented at the Microcomputer Applications in Artificial Lift Workshop sponsored by the SPE Los Angeles Basin Section, October.

Duran, J., Prado, M., 2003. “ESP Stages Air-Water Performance – Modeling and Experimental Data”, Society of Petroleum Engineers, SPE 87627.

Estevam, V., 2002, “Uma Análise Fenomenológica da Operação de Bomba Centrífuga com Escoamento Bifásico”. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 265 p. Tese (Doutorado).

Gamboa, J., 2009, “Predication of the Transition in Two-Phase Performance of an Electrical Submersible Pump” Ph.D. Dissertation, Petroleum Engineering Department, University of Tulsa.

Gamboa, J., Prado, M., 2011. “Review on ESP Surging Correlations and Models”, SPE Production and Operations Symposium, SPE 140937, Oklahoma City, Oklahoma, 27-29 March.

Kline, S.J; McClintock, E.J., 1953, “Uncertainties in Single-Sample Experiments”. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v.73, p.3-8.

Lea, J. F., Bearden J. L., 1980, “Effects of Gaseous Fluids on Submersible Pump Performance,” SPE 9218.

Melvin, C., Pessoa, R., Kallas, P., 1998, “Successful Test of New ESP technology for Lake of Maracaibo Gassy Oil Wells, OTC 8867.

Moffat, R.J., 1988, “Describing the uncertainties in experimental results”. Experimental Thermal and Fluid Science, New York.

Pessoa, R., Prado, M., 2001, “Experimental Investigation of Two-Phase Flow Performance of Electrical Submersible Pump”, SPE 71552, Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana.

Romero, M., 1999, “An Evaluation of an Electrical Submersible Pumping System for High GOR Wells”, M. S. Thesis, Petroleum Engineering Department, University of Tulsa.

Sachdeva, R., 1989, “Two-Phase Flow Through Electric Submersible Pumps”, Ph.D. dissertation, University of Tulsa, USA.

Shoham, O., 2006, “Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes”. Society of Petroleum Engineers.

Solano, E. A., 2009, “Viscous Effects on the Performance of Electrical Submersible Pumps (ESP’s)” M.Sc. Thesis, Petroleum Engineering Department, University of Tulsa.

Takács, G., 2009, “Electrical Submersible Pump Manual”, 1. Ed., Elsevier, Oxford, UK.

Trevisan, F. E., 2009, “Modeling and Visualization of Air and Viscous Liquid in Electrical Submersible Pump” Ph.D. Dissertation, Petroleum Engineering Department, University of Tulsa.

Trevisan, F. E., Prado, M. G., 2010, “Experimental Investigation on the Viscous Effects on Two-Phase Flow Patterns and Hydraulic Performance of Electrical Submersible Pumps”, CSUG/SPE 134089, Canadian Unconventional Resources & International Petroleum Conference, Canada.

Turpin, J., Lea, J., e Bearden, J., 1986, “Gas-Liquid through Centrifugal Pumps-Correlation of Data”. Proceeding of the Third International Pump Symposium, 13-20.

White, M. F., 1998, “Fluid Mechanics”, 4th edition, McGraw-Hill.

Woon, Y. L., “Downhole Pumping System for Recovering Liquids and Gas”, U.S. Patent N° 6628616.

Zapata, L., 2003, “Rotational Speed Effects on ESP Two-Phase Performance”. Petroleum Engineering Department, University of Tulsa.

APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

A calibração é o conjunto de operações que estabelece a relação entre os valores medidos por um instrumento e os valores correspondentes estabelecidas por padrões. Portanto, esse procedimento é fundamental para garantir a qualidade dos resultados expressos por essas medidas.

Neste apêndice, são apresentadas informações referentes ao processo de calibração dos instrumentos de medição utilizados nos ensaios experimentais.

Os transdutores de pressão foram calibrados por meio de um calibrador Druck DPI 615 com precisão de 0,1 kPa. O procedimento de calibração consiste em, através do calibrador, aplicar uma pressão conhecida ao instrumento e medir o sinal analógico de saída correspondente a pressão aplicada. Esse sinal analógico de corrente elétrica (4-20 mA) é condicionado e salvo através de sistema de aquisição de dados National Instruments™. Esse procedimento foi repetido aumentando-se a pressão até ser atingido o fundo de escala do sensor. Atingido esse valor máximo lido pelo instrumento, repete-se o procedimento diminuindo a pressão do valor máxima até a pressão atmosférica. A realização da calibração no sentido crescente e decrescente da medição tem como objetivo diminuir os erros de histerese do instrumento.

A medição de temperatura foi realizada através de termoresistências tipo Pt-100. As calibrações das termoresistências foram feitas por meio de um banho termostático e uma termoresistência padrão. O procedimento de calibração consiste em colocar as termoresistências imersas no banho termostático, fixar a temperatura do banho, medir essa temperatura por meio da termoresistência padrão e, medir a resistência elétrica nos terminais dos sensores a serem calibrados. Repete-se esse procedimento tanto para o aquecimento quanto para o resfriamento do banho, abrangendo toda a faixa de trabalho do instrumento, obtendo-se assim, a relação temperatura versus resistência para os instrumentos.

Quanto ao torquímetro, a curva de calibração é fornecida pelo fabricante. Dessa forma, foi realizado apenas o ajuste da retransmissão do sinal analógico de saída do instrumento. O ajuste da retransmissão foi realizado aplicando um torque conhecido ao sensor e medindo-se o valor de

tensão (0-10V) de saída, obtendo-se assim, a relação torque versus tensão. Esse procedimento de ajuste foi realizado aplicando-se o torque em ambos os sentidos de rotação.

Para a medição da vazão mássica de líquido foi empregado um medidor tipo Coriolis, sendo o certificado de calibração desse instrumento emitido pelo fabricante. O ajuste da retransmissão do sinal analógico de corrente (4-20 mA) foi feito utilizando apenas os limites de operação do instrumento, através de um ajuste linear.

Elementos de escoamento laminar (LFE, de *Laminar Flow Element*) foram utilizados para a medição da vazão volumétrica de gás. Foram empregados três medidores com diferentes faixas operacionais, de acordo com a vazão medida. Assim como o medidor de vazão mássica de líquido, os laminadores de fluxo possuem curva de calibração fornecida pelo fabricante e o ajuste da retransmissão foi realizado utilizando apenas os limites de operação do instrumento.

As Figuras A.1 a A.8 mostram os resultados das calibrações obtidas para os instrumentos de medição utilizados. A descrição da variável medida por cada instrumento é descrita na Tabela 3.2. Nos gráficos das figuras abaixo são apresentados também, as equações de ajuste dos dados coletados, assim como o coeficiente de covariância, R^2 .

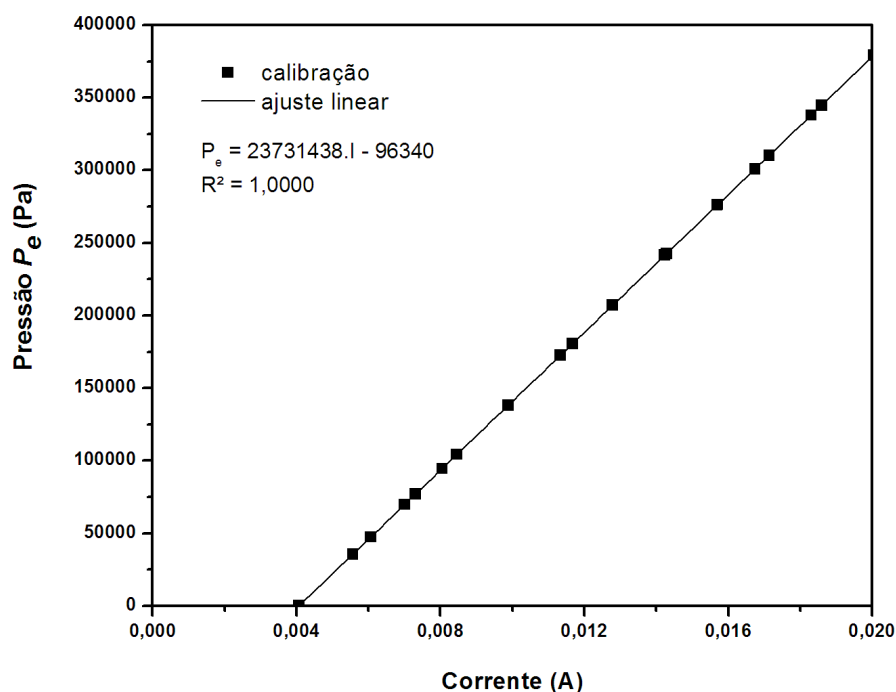


Figura. A.1 - Curva de calibração do transdutor de Pressão p_e .

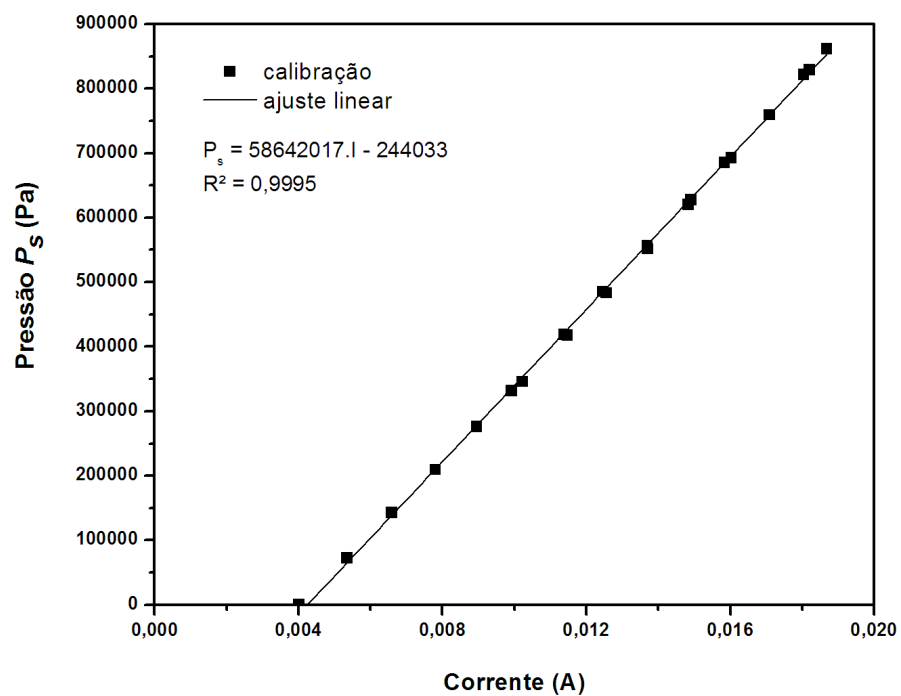


Figura. A.2 - Curva de calibração do transdutor de Pressão p_s .

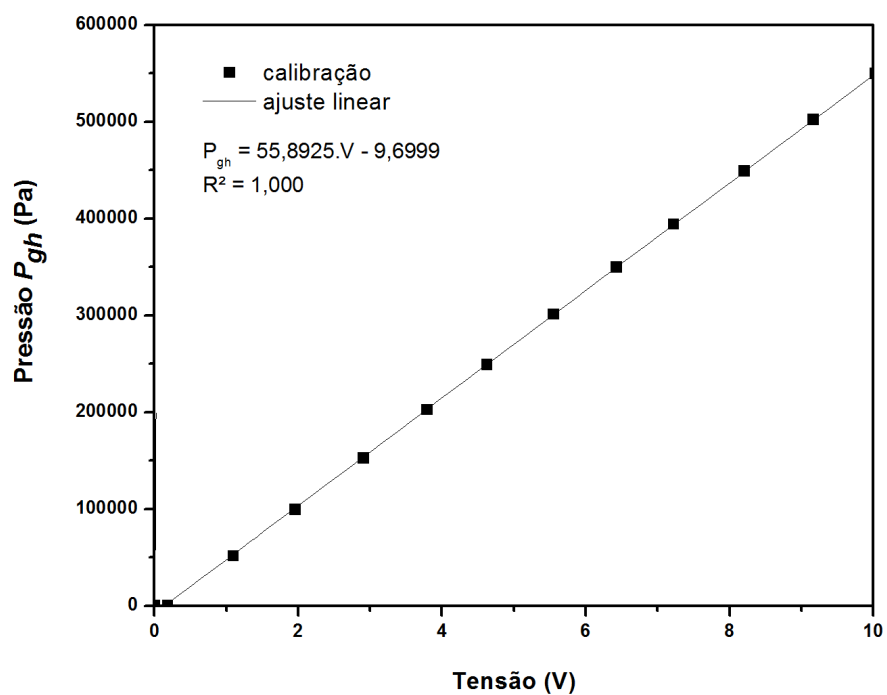


Figura. A.3 - Curva de calibração do transdutor de Pressão p_{gh} .

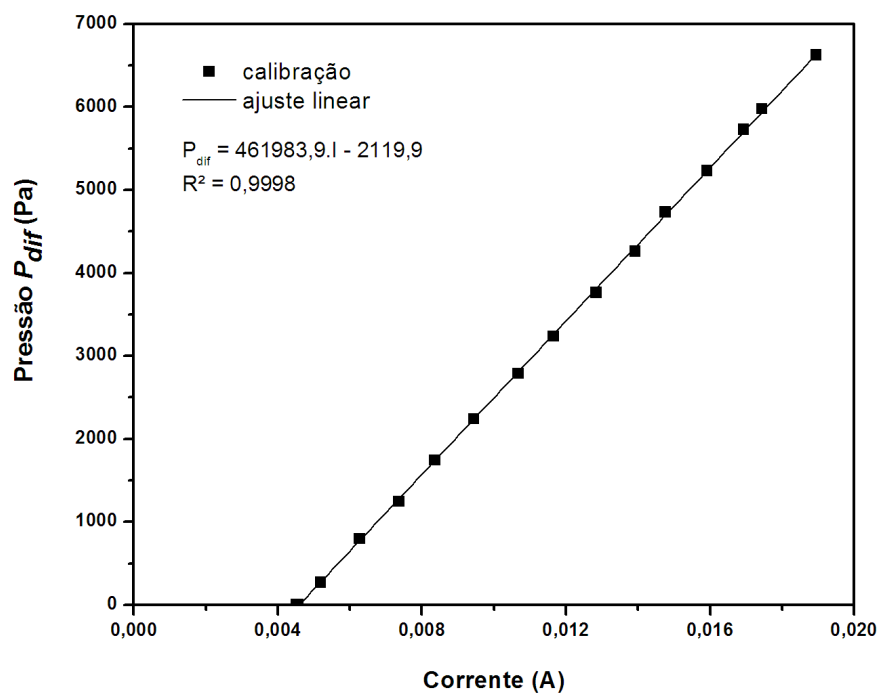


Figura. A.4 - Curva de calibração do transdutor de Pressão p_{dif} .

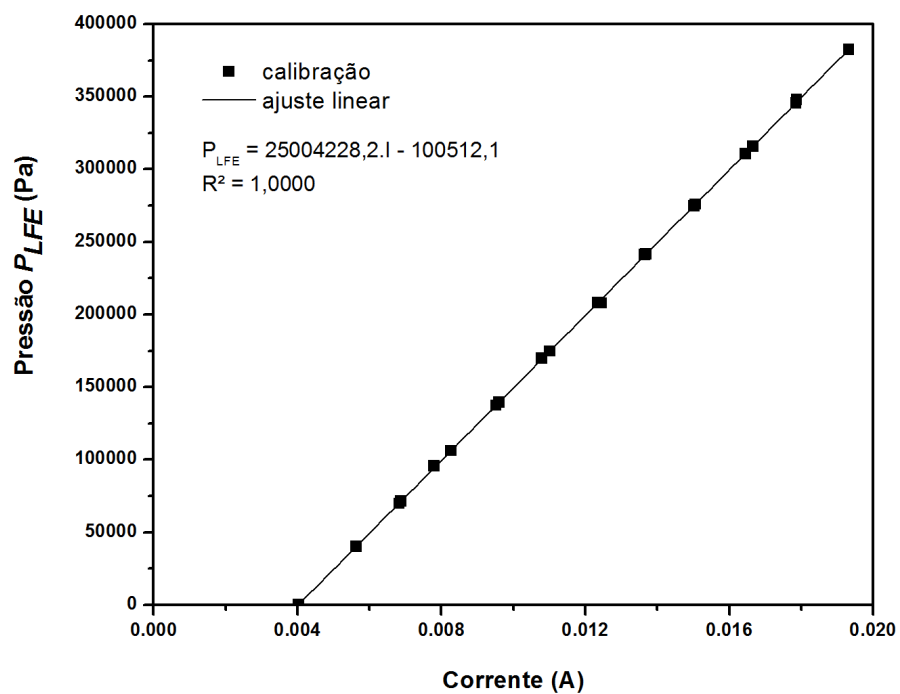


Figura. A.5 - Curva de calibração do transdutor de Pressão p_{LFE} .

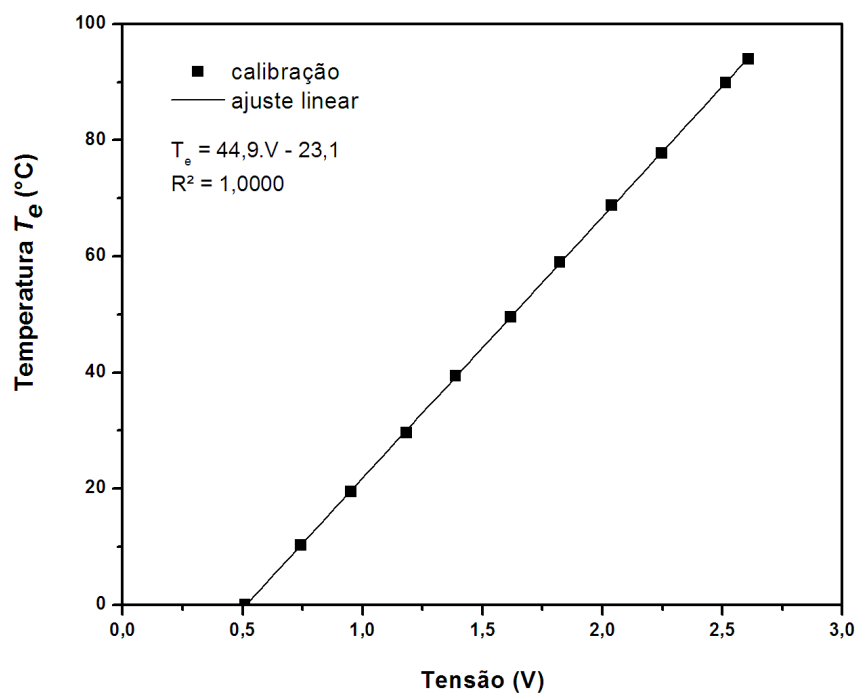


Figura. A.6 - Curva de calibração do sensor de temperatura T_e .

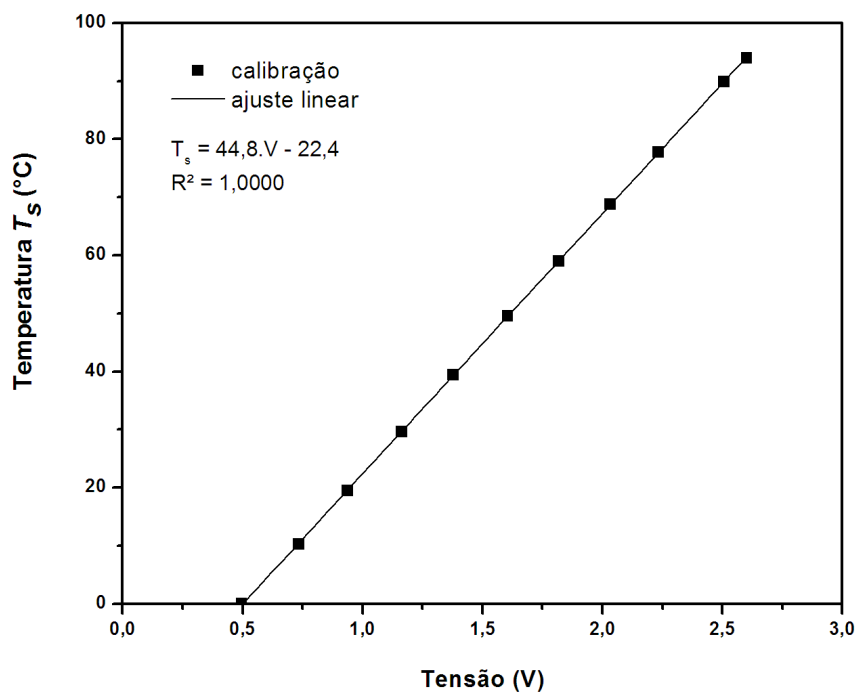


Figura. A.7 - Curva de calibração do sensor de temperatura T_s .

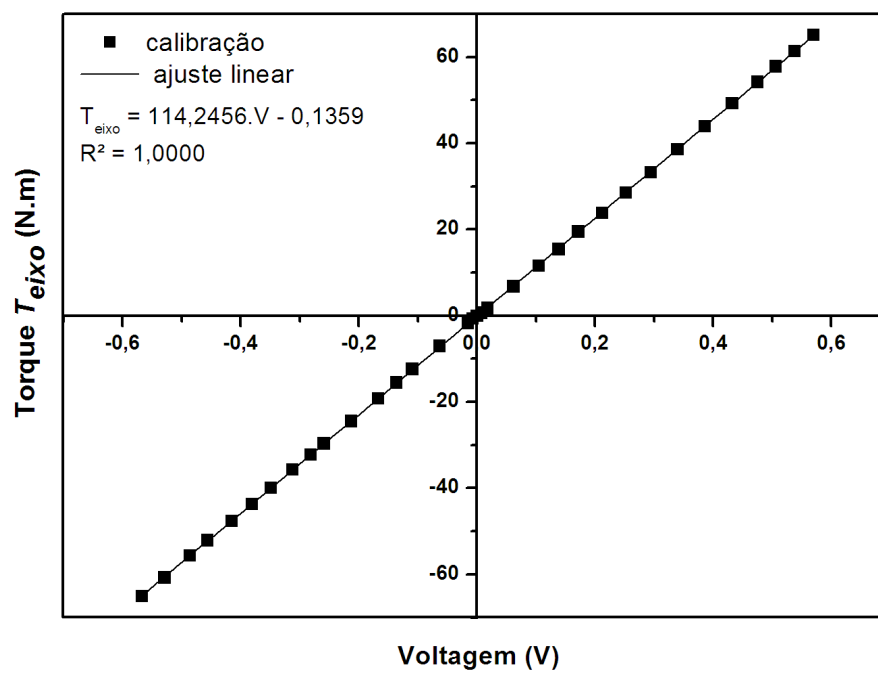


Figura. A.8 - Curva de calibração do torquímetro T_{eixo} .

APÊNDICE B – ANÁLISE DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

A confiabilidade de resultados experimentais está associada ao grau de incerteza dessas variáveis. Para que resultados experimentais sejam confiáveis, é necessário que estejam acompanhados de uma indicação quantitativa sobre seu grau de incerteza. A análise de incerteza é o procedimento utilizado para estimar e expressar essa indicação.

Baseado no trabalho de Moffat (1988), este apêndice apresenta a metodologia empregada na análise de incertezas associadas às grandezas estudadas neste trabalho.

B.1 Análise de Incerteza por Amostragem Simples

Pesquisas experimentais em mecânica dos fluidos geralmente são experimentos de amostragem simples, onde cada ponto medido é verificado uma única vez, ou no máximo algumas poucas vezes. A seguir, é apresentada a metodologia para a análise das incertezas por amostragem simples.

Seja x_i uma variável com incerteza conhecida δx_i . Essa variável pode ser expressa por;

$$x_i = x_i(\text{medido}) \pm \delta x_i \quad (\text{B. 1})$$

onde a melhor estimativa de x_i é $x_i(\text{medido})$. A incerteza de x_i tem 95% de probabilidade de estar entre $\pm \delta x_i$. O valor $x_i(\text{medido})$ representa a medida realizada, enquanto δx_i representa $2s$, onde s é o desvio padrão da população de possíveis medidas, das quais a única amostra $x_i(\text{medido})$ foi realizada. O desvio padrão da população s pode ser calculado a partir do desvio padrão da amostra S , obtido do experimento utilizando-se a distribuição de Student.

O resultado calculado a partir de um conjunto de medições pode ser representado por:

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (\text{B. 2})$$

Kline e McClintock (1953) mostraram que a incerteza do resultado calculado R pode ser estimada utilizando-se uma combinação dos efeitos individuais de cada variável sobre o

resultado. Se apenas uma variável com incerteza associada é utilizada no cálculo do resultado R , a incerteza do resultado calculado devido ao efeito dessa variável é:

$$\delta R_{x_i} = \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \quad (\text{B.3})$$

onde $\partial R / \partial x_i$ é o coeficiente de sensibilidade do resultado R em relação a variável x_i . Quando diversas variáveis independentes são utilizadas no cálculo de R , as incertezas individuais de cada variável são combinadas da seguinte forma:

$$\delta R = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.4})$$

A Equação B.4 é válida quando as medições das variáveis são independentes e expressas com a mesma probabilidade. Quando o resultado calculado R é expresso na forma de produto das variáveis medidas, tal como na Equação B.5,

$$R = x_1^a \cdot x_2^b \cdot x_3^c \dots x_n^m \quad (\text{B.5})$$

a incerteza da grandeza calculada R pode ser expressa por:

$$\frac{\delta R}{R} = \left[\left(a \frac{\delta x_1}{x_1} \right)^2 + \left(b \frac{\delta x_2}{x_2} \right)^2 + \dots + \left(m \frac{\delta x_n}{x_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.6})$$

Considerando as incertezas relativas u_R e u_{x_i} dadas pelas Equações B.7 e B.8, e substituindo-as na Equação B.6, tem-se uma forma conveniente, Equação B.9, de se expressar a incerteza da grandeza calculada R em função das incertezas relativas de cada variável independente u_{x_i} .

$$\frac{\delta R}{R} = u_R \quad (\text{B.7})$$

$$\frac{\delta x_i}{x_i} = u_{x_i} \quad (\text{B.8})$$

$$u_R = \left[(a \cdot u_{x_1})^2 + (b \cdot u_{x_2})^2 + \dots + (m \cdot u_{x_n})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B. 9})$$

As incertezas relativas u_R e u_{x_i} representam um valor de incerteza em relação ao valor medido, ou seja, essa incerteza é uma fração do valor medido.

B.2 Análise de Incerteza para Escoamento Monofásico.

A seguir, é apresentada a análise de incertezas das variáveis no escoamento monofásico com água.

- Altura de elevação (H): a altura de elevação da bomba é calculada por:

$$H = \Delta p \rho_L^{-1} g^{-1} \quad (\text{B. 10})$$

Utilizando a Equação B.9 e desprezando a incerteza associada à gravidade, a incerteza associada à altura de elevação pode ser calculada por;

$$u_H = \left[(u_{\Delta p})^2 + (-u_{\rho_L})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B. 11})$$

Considerando ρ_L como função apenas da temperatura, tem-se como $u_{\rho_L} = u_{T_e}$. Como Δp também representa um valor calculado e sua incerteza será estimada considerando:

$$u_{\Delta p} = \left[(u_{p_s})^2 + (-u_{p_e})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B. 12})$$

- Potencia mecânica (P_m): A potência mecânica consumida no acionamento da BCS é calculada por:

$$P_m = \omega T_{eixo} \quad (\text{B. 13})$$

A incerteza associada ao cálculo da potencia de mecânica é:

$$u_{P_m} = \left[(u_{\omega})^2 + (u_{T_{eixo}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B. 14})$$

- Potencia hidráulica (P_h): A potência hidráulica transferida ao fluido pela BCS é calculada por:

$$P_h = \Delta p q_L \quad (\text{B.15})$$

A incerteza associada ao cálculo da potencia de hidráulica é:

$$u_{P_h} = \left[(u_{\Delta p})^2 + (u_{q_L})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.16})$$

- Eficiência (η): A eficiência do funcionamento da bomba é calculada por:

$$\eta = \Delta p q_L \omega^{-1} T_{eixo}^{-1} \quad (\text{B.17})$$

A incerteza associada ao cálculo da eficiência da bomba é:

$$u_{\eta} = \left[(u_{\Delta p})^2 + (u_{q_L})^2 + (-u_{\omega})^2 + (-u_{T_{eixo}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.18})$$

- Coeficiente adimensional de vazão (q_L^*): O coeficiente adimensional de vazão é calculado por:

$$q_L^* = q_L \omega^{-1} D^{-3} \quad (\text{B.19})$$

A incerteza associada ao cálculo do coeficiente de vazão da bomba é:

$$u_{q_L^*} = \left[(u_{q_L})^2 + (-u_{\omega})^2 + (-3u_D)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.20})$$

- Coeficiente adimensional de carga (H^*): O coeficiente adimensional de carga é calculado por:

$$H^* = gH \omega^{-2} D^{-2} \quad (\text{B.21})$$

Desprezando a incerteza associada ao valor da gravidade, a incerteza do cálculo do coeficiente de carga é expressa por:

$$u_{H^*} = \left[(u_H)^2 + (-2u_{\omega})^2 + (-2u_D)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.22})$$

- Coeficiente adimensional de potência (P^*): O coeficiente adimensional de potência é calculado por:

$$P^* = P_m \rho_L^{-1} \omega^{-3} D^{-5} \quad (\text{B.23})$$

A incerteza do cálculo do coeficiente de potência é expressa por:

$$u_{P^*} = \left[(u_{P_m})^2 + (-u_{\rho_L})^2 + (-3u_{\omega})^2 + (-5u_D)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.24})$$

B.3 Análise de Incerteza para Escoamento Bifásico Gás-Líquido.

A seguir, são avaliadas as incertezas associados ao experimento com a bomba operando com escoamento bifásico gás-líquido.

A Equação B.9 é válida para o cálculo da incerteza quando uma grandeza é expressa em termos de produtos de outras variáveis independentes, o que simplifica bastante o procedimento de cálculo. Quando uma grandeza é expressão pela soma de outras variáveis, o procedimento descrito pela Equação B.9 superestima o valor da incerteza. Pela simplicidade dos cálculos, adotaremos como estimativa da incerteza de grandezas calculadas pela soma de outras variáveis, o procedimento descrito pela Equação B.9.

- Vazão volumétrica de mistura (q): A vazão volumétrica de mistura é definida como:

$$q = q_G + q_L \quad (\text{B.25})$$

Conforme simplificação descrita acima, o valor da incerteza associada à vazão total de mistura é:

$$u_q = \left[(u_{q_G})^2 + (u_{q_L})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.26})$$

onde a vazão de gás na sucção da bomba (q_G) é função da vazão de gás no laminador de fluxo ($q_{G,LFE}$), da pressão (p_e) e temperatura (T_e) de sucção, portando u_{q_G} pode ser calculado por:

$$u_{q_G} = \left[(u_{q_{G,LFE}})^2 + (u_{p_e})^2 + (u_{T_e})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.26})$$

- Fração Volumétrica de gás (λ): A fração volumétrica de gás é definida como:

$$\lambda = \frac{q_G}{q} \quad (\text{B. 28})$$

A incerteza do cálculo da fração volumétrica de gás é dada por:

$$u_\lambda = \left[(u_{q_G})^2 + (-u_q)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B. 29})$$

- Eficiência (η): A eficiência da bomba para o escoamento bifásico é definido por:

$$\eta = \Delta p \, q \, \omega^{-1} \, T_{eixo}^{-1} \quad (\text{B. 30})$$

A incerteza do associado ao rendimento da BCS operando com escoamento bifásico é:

$$u_\eta = \left[(u_{\Delta p})^2 + (u_q)^2 + (-u_\omega)^2 + (-u_{T_{eixo}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B. 31})$$

Os resultados para a BCS operando com escoamento bifásico são apresentados na forma normalizada. Assim, a incerteza associada a essas variáveis são expressas a seguir.

- Variação de pressão normalizada:

$$u_{\Delta p_n} = [2(\Delta p)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B. 32})$$

- Vazão de mistura normalizada:

$$u_{q_n} = [2(q)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B. 33})$$

- Potência mecânica normalizada:

$$u_{P_{m,n}} = [2(P_m)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B. 34})$$

- Eficiência normalizada:

$$u_{\eta_n} = [2(\eta)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B. 35})$$

B.4 Precisão dos Instrumentos de Medição

A precisão dos instrumentos utilizados nos ensaios experimentais é dada conforme catálogo do fabricante. Esses valores são apresentados na Tabela B.1. A incerteza do instrumento será considerada igual à precisão declarada pelo fabricante, geralmente denominada Incerteza do Tipo B. Entretanto, a utilização dos instrumentos na faixa inicial de sua escala conduz à obtenção de incertezas mais elevadas. No caso do medidor de vazão líquido que operou em uma faixa inicial de sua escala, considerou-se um valor intermediário para o cálculo da incerteza do instrumento.

Tabela. B.1 - Precisão dos Instrumentos de medição segundo fabricante.

Variável	Precisão Segundo Catálogo	Incerteza Relativa
p_e	1% do fundo de escala (4bar)	$u_{p_e} = \pm 1\%$
p_s	1% do fundo de escala (fundo de escala 125psi)	$u_{p_s} = \pm 1\%$
$q_{G,EFL}$	0,5% sobre o valor lido	$u_{G,EFL} = \pm 0,5\%$
q_L	0,5% do fundo de escala (fundo de escala 190,5 t/h)	$u_{q_L} = \pm 1\%$
T_{eixo}	1,5% sobre o valor lido	$u_{T_{eixo}} = \pm 1,5\%$
T_e	0,1% sobre o valor lido	$u_{T_e} = \pm 0,1\%$
T_s	0,1% sobre o valor lido	$u_{T_s} = \pm 0,1\%$
ω	2% sobre o valor lido	$u_{\omega} = \pm 2\%$

B.5 Incertezas Experimentais.

A seguir, são apresentadas as incertezas calculadas. A Tabela B.2 apresenta os resultados das incertezas para os experimentos monofásicos e a Tabela B.3 as incertezas para os experimentos bifásicos.

Tabela. B.2 - Incertezas para os experimentos monofásicos.

Variável	Incerteza Relativa
Altura de carga (H)	$u_H = \pm 1,42\%$
Potência mecânica (P_m)	$u_{P_m} = \pm 2,5\%$
Potência hidráulica (P_h)	$u_{P_h} = \pm 1,73\%$
Eficiência (η)	$u_\eta = \pm 3,04\%$
Coefficiente Adimensional de Vazão (q_L^*)	$u_{q_L^*} = \pm 2,26\%$
Coefficiente Adimensional de carga (H^*)	$u_{H^*} = \pm 4,25\%$
Coefficiente Adimensional de potência (P^*)	$u_{P^*} = \pm 6,52\%$

Tabela. B.3 - Incertezas para os experimentos bifásicos.

Variável	Incerteza Relativa
Vazão de Mistura (q)	$u_q = \pm 1,50\%$
Vazão de gás na sucção da bomba (q_G)	$u_{q_G} = \pm 1,12\%$
Fração volumétrica de gás (λ)	$u_\lambda = \pm 1,87\%$
Eficiência (η)	$u_\eta = \pm 3,24\%$
Diferença de pressão normalizada (Δp_n)	$u_{\Delta p_n} = \pm 2,00\%$
Vazão de mistura normalizada (q_n)	$u_{q_n} = \pm 2,12\%$
Potência normalizada ($P_{m,n}$)	$u_{P_{m,n}} = \pm 3,53\%$
Eficiência normalizada (η_n)	$u_{\eta_n} = \pm 4,58\%$

ANEXO I – FOTOS DA MONTAGEM EXPERIMENTAL.



Figura: I.1 - Bomba *booster* (externa)

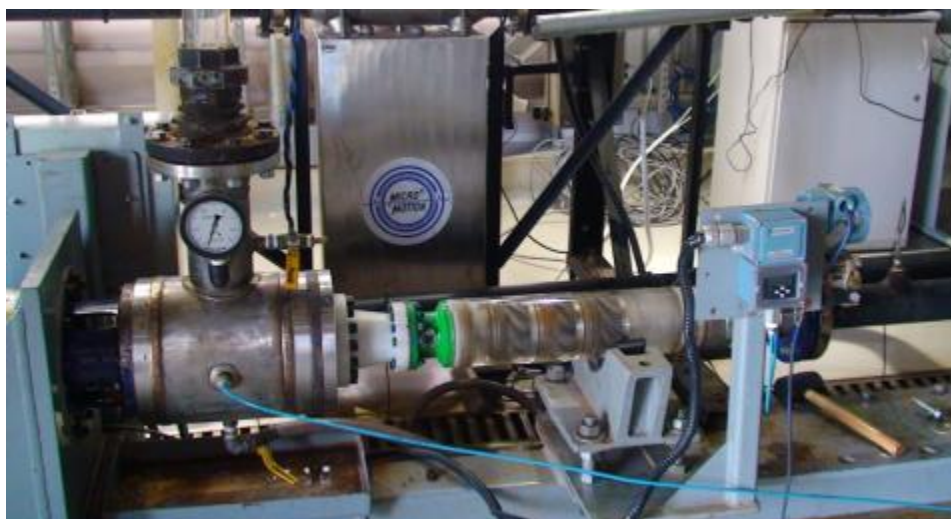


Figura: I.2 - Bomba GN 7000 instalada no *skid* de testes.



Figura: I.3 - Conjunto AGH e BCS instalados no *skid* de testes.



Figura: I.4 – Medidores de vazão de gás.



Figura: I.5 - Detalhe do injetor de gás.



Figura: I.6 - Bocal injetor de gás.



Figura: I.7 - Tanque de armazenamento de água.



Figura: I.8 - Trocador de calor casco-tubo e bomba de calor.



Figura: I.9 - Inversores de frequência.



Figura: I.10 - Medidor de vazão mássico.

ANEXO II – TABELAS DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Tabela: II.1 - Ensaio de desempenho, bomba GN 7000, 1200 rpm, monofásico.

q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	H [mca]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
21,67	51,93	53,21	0,1	1,94	20,7	21,1	243,7	7,7	3,2
21,09	53,80	59,46	0,6	1,88	20,7	21,1	236,5	33,1	14,0
19,39	59,08	69,63	1,1	1,69	20,7	21,1	212,6	56,8	26,7
18,23	48,92	64,56	1,6	1,82	20,7	21,1	229,3	79,2	34,5
16,76	52,80	73,68	2,1	1,88	20,7	21,1	236,0	97,2	41,2
15,19	46,85	70,98	2,5	1,77	20,7	21,1	222,1	101,8	45,8
13,39	50,68	78,60	2,9	1,66	20,7	21,1	209,0	103,8	49,7
11,76	53,92	87,19	3,4	1,59	20,7	21,1	199,9	108,7	54,4
10,26	56,48	91,89	3,6	1,60	20,7	21,1	201,5	100,9	50,0
8,61	59,01	96,84	3,9	1,40	20,7	21,1	175,3	90,5	51,6
5,86	49,96	91,94	4,3	1,46	20,7	21,1	183,2	68,3	37,3
4,49	41,48	87,20	4,7	1,23	20,7	21,1	154,5	57,0	36,9
2,71	42,29	87,30	4,6	1,23	20,7	21,1	154,9	33,8	21,8
0,73	42,64	87,28	4,6	1,13	20,8	21,1	141,6	9,0	6,4
0,74	42,67	87,30	4,6	1,16	20,9	21,2	146,2	9,2	6,3
1,34	42,49	87,27	4,6	1,21	20,8	21,3	152,1	16,6	10,9
2,76	49,41	96,46	4,8	1,31	20,7	21,2	164,2	36,0	22,0
6,01	47,50	91,84	4,5	1,42	20,7	21,1	178,3	74,0	41,5
8,66	64,32	105,45	4,2	1,41	20,8	21,1	176,8	98,9	56,0
9,97	62,36	100,89	3,9	1,68	20,8	21,1	211,6	106,8	50,5
11,36	60,01	93,56	3,4	1,64	20,8	21,1	205,5	105,9	51,5
13,25	56,28	86,82	3,1	1,67	20,8	21,1	209,9	112,4	53,6
15,06	52,28	78,13	2,6	1,94	20,8	21,1	244,4	108,1	44,2
16,54	48,66	69,81	2,2	1,85	20,8	21,1	232,5	97,2	41,8
17,49	46,34	66,34	2,0	1,79	20,8	21,2	225,2	97,2	43,1
20,26	74,24	82,66	0,9	1,93	20,8	21,2	242,0	47,4	19,6
21,12	71,53	78,06	0,7	2,01	20,8	21,2	252,5	38,3	15,2

Tabela: II.2 - Ensaio de desempenho, bomba GN 7000, 1800 rpm, monofásico (repetição #1).

q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	H [mca]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
32,01	33,26	41,70	0,9	4,61	21,6	22,3	869,0	75,0	8,6
27,14	56,17	96,75	4,1	4,59	21,6	22,4	865,2	305,9	35,4
24,16	57,08	110,79	5,5	4,17	21,7	22,4	785,4	360,4	45,9
21,15	56,35	123,78	6,9	3,96	21,7	22,4	746,3	396,1	53,1
18,03	55,42	132,40	7,9	3,86	21,7	22,4	728,4	385,6	52,9
14,70	53,81	141,89	9,0	3,28	21,8	22,5	617,9	359,7	58,2
12,09	50,48	146,36	9,8	3,99	21,8	22,5	752,6	322,0	42,8
8,81	55,59	159,82	10,7	3,75	21,8	22,5	707,5	255,0	36,0
6,03	58,62	167,97	11,2	2,87	21,8	22,6	540,7	183,1	33,9
2,89	52,53	160,54	11,0	2,98	21,9	22,7	561,7	86,6	15,4
0,72	52,75	159,72	10,9	2,71	21,9	22,7	510,7	21,3	4,2
3,02	52,39	161,68	11,2	2,80	21,9	22,7	527,7	91,6	17,4
6,29	50,58	159,54	11,1	2,95	21,9	22,6	555,7	190,4	34,3
9,24	55,24	159,54	10,7	3,10	21,9	22,6	583,7	267,6	45,8
12,10	50,64	146,03	9,8	3,25	21,9	22,6	611,7	320,5	52,4
15,04	44,83	132,28	8,9	3,43	21,9	22,5	646,5	365,3	56,5
17,95	46,62	123,44	7,9	3,75	21,9	22,6	706,0	383,0	54,2
21,00	55,65	123,46	6,9	4,02	22,0	22,6	757,3	395,6	52,2
23,82	63,24	123,05	6,1	4,27	22,0	22,6	805,4	395,8	49,1
27,05	49,62	91,52	4,3	4,29	22,0	22,6	809,1	314,9	38,9
30,19	52,97	78,08	2,6	4,36	22,0	22,7	822,7	210,6	25,6
33,16	57,33	62,33	0,5	4,67	22,1	22,7	881,1	46,1	5,2

Tabela: II.3 - Ensaio de desempenho, bomba GN 7000, 1800 rpm, monofásico (repetição #2).

q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	H [mca]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
33,00	58,07	63,76	0,6	4,61	22,6	23,2	868,5	52,1	6,0
30,13	54,97	79,74	2,5	4,70	22,6	23,2	886,1	207,4	23,4
28,74	61,59	96,34	3,6	4,69	22,6	23,2	884,1	277,5	31,4
25,74	62,02	111,11	5,0	4,75	22,7	23,3	895,7	351,0	39,2
22,26	51,57	114,61	6,4	4,20	22,7	23,3	792,6	389,7	49,2
19,54	45,49	118,52	7,5	3,97	22,7	23,3	747,4	396,4	53,0
16,49	53,54	136,94	8,5	3,75	22,7	23,3	706,4	382,1	54,1
13,54	59,98	152,65	9,5	3,54	22,7	23,3	668,0	348,6	52,2
10,79	48,50	147,55	10,1	3,21	22,7	23,3	606,0	296,8	49,0
7,69	52,86	159,44	10,9	2,96	22,7	23,3	558,3	227,7	40,8
4,18	55,65	165,77	11,3	2,99	22,8	23,4	563,4	127,9	22,7
1,61	56,20	166,29	11,3	2,88	22,8	23,6	542,1	49,2	9,1
0,74	56,38	164,00	11,0	2,85	22,8	23,6	536,4	22,1	4,1
4,00	55,69	166,37	11,3	3,08	22,8	23,4	581,5	122,8	21,1
5,77	54,68	163,81	11,2	3,05	22,7	23,3	574,6	174,9	30,4
8,56	51,78	155,90	10,6	3,25	22,7	23,3	612,5	247,7	40,4
12,24	54,10	150,33	9,8	3,49	22,7	23,3	658,8	327,1	49,6
14,98	48,71	136,74	9,0	3,70	22,7	23,3	696,8	366,2	52,6
18,47	63,15	141,36	8,0	4,01	22,7	23,3	756,2	401,2	53,1
20,75	56,69	124,93	7,0	3,92	22,8	23,3	738,4	393,2	53,3
23,68	46,33	104,18	5,9	4,12	22,8	23,3	777,2	380,5	49,0
27,14	50,36	91,35	4,2	4,32	22,8	23,3	813,9	309,0	38,0
30,09	82,03	109,95	2,9	4,45	22,8	23,3	838,8	233,4	27,8
33,73	62,97	63,21	0,0	5,06	22,8	23,4	954,2	2,2	0,2

Tabela: II.4 - Ensaio de desempenho, bomba GN 7000, 1800 rpm, monofásico (repetição #3).

q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	H [mca]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
32,95	67,54	73,57	0,6	4,41	22,8	23,4	831,4	55,2	6,6
29,73	49,57	76,47	2,8	4,46	22,9	23,4	840,5	222,1	26,4
26,37	65,38	110,76	4,6	4,27	22,9	23,4	805,5	332,4	41,3
23,06	61,32	123,47	6,4	4,15	22,9	23,4	782,6	398,2	50,9
17,14	48,33	128,03	8,1	3,70	22,9	23,4	697,9	379,4	54,4
13,45	56,41	147,66	9,3	3,46	22,9	23,4	651,7	340,9	52,3
10,70	48,50	146,08	10,0	3,42	22,9	23,4	644,2	289,9	45,0
7,40	53,20	159,53	10,9	3,04	22,9	23,4	572,1	218,6	38,2
4,37	41,58	150,11	11,1	3,07	22,9	23,4	578,8	131,6	22,7
3,11	42,04	150,47	11,1	2,80	22,8	23,4	527,1	93,7	17,8
0,73	42,37	149,14	10,9	2,84	22,9	23,4	535,4	21,8	4,1
0,75	42,38	149,11	10,9	2,73	23,1	23,5	513,7	22,1	4,3
3,63	51,63	159,45	11,0	2,61	22,8	23,4	492,2	108,9	22,1
6,94	62,33	168,68	10,9	3,05	22,7	23,2	574,6	204,9	35,7
11,00	56,85	154,98	10,0	3,56	22,8	23,3	670,5	299,8	44,7
14,50	50,21	137,38	8,9	3,73	22,8	23,3	703,5	351,2	49,9
17,68	52,26	129,25	7,9	3,90	22,8	23,3	735,7	378,0	51,4
21,57	55,88	123,34	6,9	3,90	22,8	23,3	735,0	404,2	55,0
24,98	42,97	91,95	5,0	4,19	22,8	23,3	790,7	339,8	43,0
29,17	45,73	73,77	2,9	4,36	22,8	23,3	821,6	227,2	27,6
30,74	57,88	78,20	2,1	4,55	22,8	23,3	857,4	173,5	20,2
32,85	47,11	50,65	0,4	4,41	22,8	23,3	831,8	32,3	3,9

Tabela: II.5 - Ensaio de desempenho, bomba GN 7000, 1800 rpm, monofásico (repetição #4).

q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	H [mca]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
32,85	47,01	50,67	0,4	4,20	22,8	23,3	791,8	33,4	4,2
30,19	60,12	83,05	2,3	4,38	22,8	23,3	825,3	192,3	23,3
26,56	51,86	95,72	4,5	4,21	22,8	23,3	793,6	323,6	40,8
23,29	52,57	110,14	5,9	4,12	22,8	23,3	775,9	372,3	48,0
19,46	44,63	114,68	7,2	3,93	22,8	23,2	741,0	378,6	51,1
16,35	52,87	135,45	8,4	3,70	22,8	23,2	698,2	375,0	53,7
11,87	50,43	146,06	9,8	3,22	22,8	23,2	607,4	315,3	51,9
7,16	57,30	163,96	10,9	3,06	22,8	23,2	576,2	212,3	36,8
4,70	38,18	146,01	11,0	2,66	22,7	23,2	501,5	140,8	28,1
1,30	39,25	145,97	10,9	2,74	22,7	23,4	516,9	38,6	7,5
0,70	39,38	145,98	10,9	2,46	22,8	23,5	463,3	20,7	4,5
0,71	39,38	145,98	10,9	2,59	23,0	23,5	488,1	21,1	4,3
2,59	52,25	159,57	11,0	2,84	22,8	23,4	534,8	77,3	14,4
5,90	65,47	173,38	11,0	3,03	22,5	23,0	571,9	176,9	30,9
9,49	61,56	163,93	10,5	3,16	22,7	23,1	595,9	269,8	45,3
14,13	53,11	143,32	9,2	3,59	22,7	23,1	676,4	354,1	52,3
17,34	57,80	137,59	8,2	3,77	22,7	23,1	710,0	384,4	54,1
19,92	50,79	123,41	7,4	3,86	22,7	23,1	727,8	401,8	55,2
23,63	52,81	109,82	5,8	4,21	22,7	23,1	794,4	374,3	47,1
26,16	60,21	108,02	4,9	4,12	22,7	23,0	776,1	347,4	44,8
28,54	49,57	82,62	3,4	4,19	22,7	23,0	789,6	262,1	33,2
33,20	59,78	63,62	0,4	4,21	22,7	23,0	793,9	35,4	4,5

Tabela: II.6 - Ensaio de desempenho, bomba GN 7000, 1800 rpm, monofásico (repetição #5).

q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	H [mca]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
33,05	62,94	65,60	0,3	4,30	19,2	19,5	811,3	24,5	3,0
30,33	49,79	69,39	2,0	4,35	19,2	19,5	820,2	165,1	20,1
27,22	64,23	105,85	4,3	4,23	19,2	19,6	798,1	314,7	39,4
24,54	45,12	96,58	5,3	4,27	19,2	19,6	804,1	350,7	43,6
21,58	56,06	119,87	6,5	4,03	19,2	19,6	758,8	382,4	50,4
18,09	54,64	128,81	7,6	3,94	19,2	19,6	743,6	372,8	50,1
15,24	48,72	133,17	8,6	3,65	19,2	19,6	687,3	357,6	52,0
12,17	54,75	148,44	9,6	3,37	19,3	19,6	634,4	316,8	49,9
8,95	49,49	151,21	10,4	3,10	19,3	19,6	583,8	252,8	43,3
6,00	52,74	160,19	11,0	2,98	19,3	19,7	561,5	179,1	31,9
3,28	54,18	160,74	10,9	2,99	19,3	19,7	564,3	97,1	17,2
0,69	45,87	151,13	10,8	2,73	19,4	19,8	513,9	20,2	3,9
0,70	45,88	151,10	10,8	2,74	19,6	20,0	516,8	20,4	3,9
3,73	45,28	151,13	10,8	2,93	19,3	19,8	552,6	109,6	19,8
7,56	63,97	169,10	10,7	3,21	19,3	19,7	605,9	220,6	36,4
13,35	70,18	162,77	9,5	3,80	19,3	19,7	715,5	343,4	48,0
16,43	63,43	146,35	8,5	3,96	19,3	19,7	747,1	378,4	50,7
19,46	55,61	127,71	7,4	3,98	19,3	19,7	750,9	389,7	51,9
22,48	45,78	105,83	6,1	4,15	19,4	19,7	781,6	375,1	48,0
25,57	57,55	105,68	4,9	4,36	19,4	19,7	821,6	341,8	41,6
28,60	44,12	74,18	3,1	4,67	19,4	19,8	879,7	238,8	27,1
31,09	71,97	91,26	2,0	4,54	19,4	19,8	855,7	166,6	19,5
33,26	60,38	61,46	0,1	4,64	19,4	19,8	873,7	10,0	1,1

Tabela: II.7 - Ensaio de desempenho, bomba GN 7000, 2400 rpm, monofásico.

q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	H [mca]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
44,40	69,07	76,12	0,7	7,78	19,5	19,9	1955,8	87,0	4,4
41,62	50,77	82,75	3,3	7,79	19,6	20,0	1957,1	369,8	18,9
39,16	46,58	99,45	5,4	7,81	19,6	20,0	1964,1	575,2	29,3
36,45	62,24	137,27	7,7	7,63	19,6	20,0	1917,1	759,7	39,6
32,90	48,35	145,64	9,9	7,67	19,7	20,1	1928,9	889,1	46,1
30,11	26,67	137,69	11,4	7,57	19,7	20,1	1903,3	928,6	48,8
27,18	39,76	165,27	12,8	7,27	19,7	20,1	1827,8	947,7	51,9
24,28	51,98	191,87	14,3	7,11	19,8	20,1	1787,4	943,4	52,8
20,72	49,92	204,60	15,8	6,99	19,8	20,2	1755,7	890,2	50,7
17,66	43,23	209,06	17,0	6,65	19,8	20,2	1671,2	813,3	48,7
15,19	48,97	226,77	18,2	6,07	19,8	20,2	1525,1	750,1	49,2
11,18	56,69	244,42	19,2	5,43	19,8	20,2	1365,0	583,1	42,7
6,57	43,47	237,01	19,8	5,45	19,9	20,3	1370,1	353,4	25,8
3,38	38,05	231,37	19,8	5,14	19,9	20,5	1291,7	181,6	14,1
0,72	38,40	230,19	19,6	4,73	20,0	20,5	1188,3	38,2	3,2
0,72	38,37	230,15	19,6	4,98	20,3	20,8	1250,5	38,1	3,0
1,90	38,17	230,98	19,7	4,95	20,1	21,2	1244,7	101,9	8,2
4,47	37,56	230,89	19,8	5,28	19,9	20,5	1328,0	239,8	18,1
7,55	43,00	235,29	19,7	5,49	20,0	20,4	1380,9	403,1	29,2
10,49	39,10	226,34	19,1	5,72	20,0	20,4	1438,4	545,9	37,9
13,08	44,22	226,34	18,6	5,94	20,0	20,4	1492,8	661,7	44,3
19,70	41,19	199,64	16,2	6,49	20,0	20,4	1631,9	867,2	53,1
22,41	53,17	199,59	15,0	6,95	20,1	20,4	1747,5	911,3	52,2
25,80	40,05	172,86	13,6	7,08	20,1	20,4	1779,0	951,9	53,5
28,25	29,67	150,67	12,4	7,39	20,1	20,5	1858,4	949,4	51,1
31,17	39,77	146,27	10,9	7,58	20,1	20,5	1905,7	922,1	48,4
34,33	47,38	134,17	8,9	7,63	20,2	20,6	1917,1	827,7	43,2
38,16	53,62	114,70	6,2	7,87	20,2	20,6	1978,2	647,5	32,7
40,74	38,10	76,89	4,0	7,89	20,2	20,6	1982,8	438,9	22,1
43,58	57,11	70,30	1,3	7,95	20,3	20,7	1998,1	159,7	8,0

Tabela: II.8 - Ensaio de desempenho, AGH 1200 rpm, monofásico.

q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	H [mca]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
12,39	60,24	62,34	0,2	2,43	23,2	23,5	305,2	7,3	2,4
10,38	63,61	93,92	3,1	2,52	23,2	23,5	316,4	87,4	27,6
9,10	65,47	111,83	4,7	2,47	23,2	23,5	310,7	117,2	37,7
7,64	67,42	129,69	6,4	2,40	23,3	23,5	301,1	132,1	43,9
6,32	68,83	144,67	7,8	2,37	23,3	23,6	298,1	133,2	44,7
4,44	70,21	165,10	9,7	2,14	23,3	23,6	269,3	117,0	43,5
3,14	70,91	180,00	11,2	2,09	23,3	23,6	263,2	95,2	36,2
1,60	71,21	191,37	12,3	2,10	23,4	23,7	264,3	53,4	20,2
0,71	71,46	200,06	13,1	1,73	23,4	23,7	216,9	25,3	11,7
0,69	71,41	200,05	13,2	1,69	23,4	23,7	212,8	24,6	11,6
1,88	71,08	186,84	11,8	1,96	23,5	23,8	246,7	60,6	24,6
3,89	70,55	173,52	10,5	2,02	23,5	23,7	253,5	111,3	43,9
5,32	69,63	155,94	8,8	2,40	23,5	23,7	301,2	127,6	42,4
6,71	68,29	142,66	7,6	2,39	23,4	23,6	300,2	138,6	46,2
8,05	67,00	124,91	5,9	2,46	23,4	23,6	309,4	129,5	41,9
10,27	63,97	98,13	3,5	2,45	23,4	23,6	308,1	97,5	31,6
11,11	62,57	84,66	2,3	2,39	23,4	23,6	300,6	68,2	22,7
12,16	60,50	66,71	0,6	2,38	23,4	23,7	299,6	21,0	7,0

Tabela: II.9 - Ensaio de desempenho, AGH 1800 rpm, monofásico.

q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	H [mca]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
18,79	52,82	54,19	0,1	5,12	23,5	23,7	964,3	7,2	0,7
18,09	54,77	75,81	2,2	5,37	23,5	23,7	1011,6	105,7	10,5
16,01	60,47	129,59	7,1	5,36	23,5	23,7	1010,7	307,4	30,4
14,61	64,00	160,61	9,9	5,41	23,5	23,7	1020,3	392,1	38,4
13,06	67,50	187,09	12,2	5,46	23,5	23,7	1028,4	433,7	42,2
10,57	72,39	228,36	15,9	5,39	23,5	23,8	1015,5	458,0	45,1
8,85	75,05	256,71	18,6	5,31	23,6	23,8	1000,2	446,4	44,6
7,64	76,62	274,40	20,2	5,10	23,6	23,8	962,1	419,6	43,6
4,96	78,91	316,77	24,3	4,79	23,6	23,9	903,3	327,5	36,3
2,61	79,81	342,13	26,8	4,19	23,6	24,0	788,9	190,5	24,1
0,74	80,48	362,98	28,9	3,77	23,6	24,0	710,7	58,0	8,2
0,74	80,48	362,57	28,8	3,68	23,7	24,1	692,7	58,2	8,4
3,01	79,68	337,34	26,3	4,25	23,6	24,0	801,4	215,7	26,9
4,32	79,29	324,54	25,1	4,55	23,7	23,9	858,2	294,4	34,3
6,49	77,79	298,58	22,6	4,87	23,7	23,9	917,3	397,9	43,4
8,03	75,92	268,60	19,7	5,17	23,6	23,9	973,9	429,5	44,1
10,01	73,04	238,35	16,9	5,27	23,6	23,9	994,3	459,6	46,2
11,31	70,88	216,66	14,9	5,28	23,6	23,9	996,2	457,8	46,0
13,08	67,25	186,17	12,2	5,38	23,7	23,9	1014,3	432,1	42,6
14,87	63,17	155,16	9,4	5,34	23,7	23,9	1006,5	380,0	37,8
16,06	60,10	128,71	7,0	5,33	23,7	23,9	1005,1	306,2	30,5
17,12	57,27	102,34	4,6	5,37	23,7	23,9	1012,1	214,3	21,2
18,43	53,52	66,50	1,3	5,01	23,7	23,9	943,6	66,5	7,0

Tabela: II.10 - Ensaio de desempenho, AGH, 2400 rpm, monofásico.

q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	H [mca]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
25,06	44,04	47,86	0,4	9,04	23,7	24,0	2271,5	26,6	1,2
24,23	47,94	80,14	3,3	9,07	23,8	24,0	2280,3	216,7	9,5
22,93	39,31	111,66	7,4	9,13	23,8	24,1	2294,9	460,9	20,1
19,78	51,21	208,68	16,1	9,44	23,8	24,1	2373,4	865,2	36,5
17,99	56,48	252,29	20,0	9,41	23,8	24,1	2364,6	978,8	41,4
15,48	43,11	287,21	25,0	9,52	23,9	24,1	2392,9	1049,6	43,9
12,76	49,03	346,21	30,4	9,43	23,9	24,2	2370,3	1052,9	44,4
12,48	28,27	329,33	30,8	9,33	23,9	24,2	2344,5	1043,9	44,5
10,08	32,40	376,10	35,1	9,00	23,9	24,2	2262,9	962,2	42,5
7,84	35,69	430,75	40,4	8,60	23,9	24,2	2161,3	860,0	39,8
5,65	38,01	470,85	44,3	8,04	23,9	24,3	2020,0	679,1	33,6
2,96	39,44	497,75	46,9	7,14	23,9	24,5	1793,2	377,1	21,0
2,02	39,76	509,23	48,0	6,93	23,9	24,7	1740,7	263,2	15,1
2,97	39,46	497,02	46,8	7,04	23,9	24,5	1769,4	378,1	21,4
4,65	38,71	483,39	45,5	7,48	23,9	24,4	1878,9	574,3	30,6
5,91	37,89	466,50	43,8	8,21	23,9	24,3	2064,1	703,3	34,1
7,07	49,06	458,03	41,8	8,30	23,9	24,3	2086,1	802,7	38,5
9,43	45,96	412,42	37,5	8,76	23,9	24,2	2202,4	960,0	43,6
10,68	43,88	391,30	35,5	8,92	24,0	24,2	2241,3	1030,8	46,0
13,36	38,67	323,47	29,1	9,39	24,0	24,2	2360,7	1056,9	44,8
16,83	84,78	306,47	22,7	9,58	24,0	24,2	2408,4	1036,2	43,0
18,94	78,82	258,84	18,4	9,66	24,1	24,3	2428,5	947,0	39,0
21,14	72,10	198,76	13,0	9,47	24,1	24,3	2381,0	743,7	31,2
23,27	64,36	131,90	6,9	9,71	24,1	24,3	2440,9	436,6	17,9
23,90	62,42	107,57	4,6	9,77	24,1	24,3	2455,9	299,7	12,2

Tabela: II.11 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1200 rpm, $\lambda=2\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
20,58	20,17	49,86	54,82	1,80	21,8	22,4	226,3	28,4	12,5
19,19	18,80	50,01	59,87	1,94	21,9	22,5	243,7	52,5	21,6
18,26	17,90	50,00	64,44	1,94	22,0	22,5	243,3	73,3	30,1
17,43	17,09	49,95	66,66	1,93	22,0	22,6	242,7	80,9	33,3
16,68	16,35	49,94	68,96	1,94	22,1	22,7	243,6	88,2	36,2
15,68	15,37	49,82	72,79	1,98	22,1	22,7	249,1	100,0	40,1
14,49	14,20	50,23	73,72	2,01	22,2	22,8	252,3	94,6	37,5
13,33	13,07	49,97	77,47	1,92	22,2	22,8	240,8	101,9	42,3
11,75	11,51	50,08	78,82	1,82	22,3	22,8	228,7	93,8	41,0
10,02	9,82	50,06	82,60	1,70	22,3	22,9	213,8	90,5	42,3
9,14	8,96	50,18	82,57	1,70	22,4	23,0	213,1	82,3	38,6
7,90	7,74	50,38	82,56	1,50	22,4	23,0	188,0	70,6	37,5
6,51	6,38	49,77	83,05	1,49	22,5	23,0	187,5	60,2	32,1
4,89	4,79	49,55	83,43	1,46	22,5	23,1	184,1	46,0	25,0
4,34	4,25	50,01	82,54	1,27	22,5	23,1	160,1	39,2	24,5
2,59	2,53	50,21	42,64	0,36	22,5	23,1	44,9	-5,4	-12,1

Tabela: II.12 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1200 rpm, $\lambda=4\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
20,97	20,13	49,94	51,63	1,92	20,5	21,1	241,4	9,8	4,1
19,90	19,11	49,77	55,72	1,98	20,6	21,1	248,5	32,9	13,2
18,72	17,97	49,78	61,48	1,91	20,6	21,2	239,9	60,8	25,4
17,86	17,15	50,12	64,45	1,95	20,7	21,2	244,5	71,1	29,1
16,97	16,30	49,84	68,92	1,90	20,7	21,3	238,5	89,9	37,7
15,95	15,31	50,00	68,74	1,73	20,8	21,4	217,4	83,1	38,2
14,11	13,55	49,83	68,94	1,70	20,9	21,4	214,1	74,9	35,0
13,33	12,80	49,96	72,33	1,77	20,9	21,5	222,3	82,8	37,3
12,17	11,68	50,19	74,84	1,67	21,1	21,6	209,5	83,3	39,8
11,10	10,66	50,48	77,86	1,72	21,1	21,7	216,1	84,5	39,1
9,42	9,04	50,20	78,17	1,55	21,2	21,7	194,5	73,2	37,6
8,35	8,01	50,02	78,93	1,52	21,2	21,8	190,8	67,0	35,1
6,50	6,24	50,15	82,24	1,22	21,2	21,8	153,2	58,0	37,8
4,84	4,65	49,68	78,11	0,99	21,3	21,8	124,5	38,2	30,7
3,44	3,30	50,30	48,26	0,88	21,3	21,9	110,5	-1,9	-1,8
2,58	2,48	50,16	41,70	0,43	21,3	21,9	54,6	-6,1	-11,1
1,99	1,91	50,47	41,78	0,46	21,4	21,9	57,2	-4,8	-8,4

Tabela: II.13 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1200 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
19,08	17,93	50,49	52,16	1,85	20,4	20,9	232,8	8,9	3,8
18,22	17,13	49,72	55,48	2,00	20,4	21,0	251,0	29,2	11,6
17,10	16,07	49,81	59,81	1,95	20,5	21,0	245,3	47,5	19,4
15,30	14,38	50,03	64,58	1,90	20,5	21,1	238,2	61,8	25,9
13,29	12,49	50,06	68,83	1,76	20,6	21,2	221,6	69,3	31,3
12,07	11,34	50,06	69,17	1,69	20,7	21,2	212,2	64,0	30,2
10,83	10,18	50,16	69,16	1,68	20,7	21,3	211,4	57,2	27,0
9,55	8,98	50,17	64,21	1,36	20,8	21,3	171,4	37,2	21,7
8,68	8,16	49,96	61,51	1,70	20,8	21,4	213,6	27,8	13,0
6,94	6,52	50,46	60,56	1,32	20,9	21,4	165,4	19,5	11,8
6,22	5,85	50,15	60,04	1,26	20,9	21,5	157,9	17,1	10,8
5,83	5,48	50,24	60,08	0,85	20,9	21,5	106,6	15,9	14,9
4,77	4,48	49,74	55,13	0,83	20,9	21,5	103,9	7,1	6,9
4,36	4,10	49,74	53,85	1,05	21,0	21,5	132,0	5,0	3,8
4,05	3,80	50,18	50,61	1,01	21,0	21,5	127,1	0,5	0,4
2,84	2,67	49,98	41,53	0,43	21,0	21,5	54,4	-6,7	-12,2
2,65	2,49	49,80	41,66	0,83	21,0	21,5	104,0	-6,0	-5,8

Tabela: II.14 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1200 rpm, $\lambda=8\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
19,63	18,06	49,99	50,64	1,33	21,9	22,5	166,7	3,5	2,1
18,33	16,86	49,65	55,23	1,52	22,0	22,5	190,8	28,4	14,9
17,29	15,91	49,73	59,42	1,40	22,0	22,6	176,4	46,6	26,4
16,09	14,80	50,00	62,86	1,51	22,0	22,6	189,6	57,5	30,3
15,21	13,99	50,01	64,37	1,46	22,1	22,6	183,1	60,6	33,1
14,22	13,09	49,58	64,33	1,50	22,1	22,7	188,7	58,3	30,9
13,07	12,02	50,06	64,50	1,24	22,1	22,7	155,7	52,4	33,6
11,63	10,70	50,15	64,14	1,18	22,2	22,7	148,8	45,2	30,4
10,43	9,59	50,35	62,67	0,93	22,2	22,8	117,1	35,7	30,5
9,81	9,03	50,20	60,76	1,04	22,2	22,8	131,1	28,8	21,9
8,90	8,19	50,32	59,85	1,09	22,2	22,8	137,3	23,6	17,2
7,30	6,72	50,38	59,82	0,79	22,3	22,8	98,7	19,2	19,4
5,94	5,47	49,84	59,66	0,78	22,3	22,8	98,1	16,2	16,5
4,55	4,19	49,92	53,76	0,58	22,3	22,8	72,3	4,9	6,7

Tabela: II.15 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1200 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
20,14	18,13	50,23	50,83	1,80	20,5	21,0	226,2	3,4	1,5
18,47	16,62	50,25	55,42	1,68	20,6	21,1	211,2	26,5	12,6
15,73	14,16	49,49	60,91	1,39	20,6	21,2	175,0	49,9	28,5
14,15	12,74	50,12	63,10	1,64	20,9	21,4	206,5	51,0	24,7
13,52	12,17	50,05	64,33	1,53	20,7	21,2	192,4	53,6	27,9
12,45	11,21	50,38	61,07	1,22	20,6	21,2	152,8	37,0	24,2
11,54	10,38	50,38	60,60	1,22	20,7	21,2	153,0	32,7	21,4
10,56	9,50	49,56	59,90	1,16	20,8	21,3	145,9	30,3	20,8
9,14	8,23	50,14	59,89	0,91	20,9	21,4	114,7	24,8	21,6
7,89	7,10	49,84	59,60	1,08	20,9	21,4	136,1	21,4	15,7
6,40	5,76	50,10	56,06	0,69	21,0	21,5	86,7	10,6	12,2
5,42	4,88	50,31	56,16	0,87	21,0	21,6	109,1	8,8	8,1
4,89	4,40	49,58	53,98	0,97	21,0	21,6	122,5	6,0	4,9
3,06	2,76	50,47	41,55	0,15	21,1	21,6	18,9	-7,6	-40,1

Tabela: II.16 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=2\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
32,66	32,01	50,41	55,59	4,23	19,6	20,2	797,7	47,0	5,9
30,65	30,04	50,15	69,40	4,11	19,7	20,2	775,1	163,9	21,1
28,71	28,14	50,19	80,63	4,66	19,7	20,3	879,0	242,8	27,6
26,89	26,36	50,34	89,42	4,19	19,7	20,3	789,9	291,9	36,9
24,33	23,85	50,21	104,35	4,28	19,8	20,3	807,6	365,9	45,3
21,65	21,22	49,97	114,76	4,18	19,8	20,4	787,4	389,6	49,5
18,61	18,23	49,58	123,99	3,91	19,9	20,4	738,0	384,6	52,1
15,69	15,38	50,03	132,98	3,82	19,9	20,5	719,6	361,6	50,3
12,83	12,58	50,56	142,03	3,45	20,0	20,5	650,4	326,1	50,1
10,18	9,98	49,86	146,54	3,17	20,0	20,5	598,3	273,4	45,7
7,86	7,70	50,08	150,71	3,04	20,1	20,6	573,8	219,7	38,3
4,80	4,70	49,54	140,90	2,72	20,2	20,7	512,5	121,8	23,8
2,94	2,88	50,52	41,52	0,55	20,1	20,7	104,2	-7,4	-7,1

Tabela: II.17 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=4\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
32,01	30,73	50,27	58,98	3,92	24,3	25,4	738,2	77,5	10,5
31,04	29,79	50,24	64,34	3,89	24,4	25,5	733,5	121,5	16,6
29,43	28,25	50,40	75,42	4,33	24,5	25,5	815,8	204,5	25,1
26,84	25,77	49,28	87,11	3,95	24,6	25,6	744,0	282,0	37,9
25,62	24,60	49,76	89,77	4,01	24,7	25,7	756,2	284,8	37,7
23,41	22,48	50,50	96,23	3,90	24,7	25,7	735,2	297,4	40,5
21,84	20,97	49,93	103,94	3,81	24,8	25,8	718,0	327,7	45,6
19,36	18,58	50,28	113,42	3,81	24,8	25,8	717,9	339,5	47,3
16,85	16,17	50,00	118,66	3,65	24,9	25,8	687,4	321,3	46,7
14,37	13,80	50,42	125,22	3,35	24,9	25,8	630,6	298,7	47,4
11,93	11,46	49,71	127,15	3,08	25,0	25,8	580,3	256,7	44,2
9,07	8,71	49,72	130,15	2,85	25,1	25,9	536,6	202,7	37,8
9,01	8,65	49,77	130,11	2,92	25,1	25,9	549,9	201,1	36,6
7,04	6,76	49,65	132,07	2,69	25,2	26,0	507,5	161,1	31,7
5,89	5,66	49,98	130,56	2,71	25,2	26,0	510,9	131,9	25,8
4,02	3,86	50,36	93,79	2,03	25,3	26,1	382,3	48,5	12,7
3,58	3,44	50,54	66,94	1,15	25,3	26,1	216,3	16,3	7,6
2,73	2,62	50,72	45,81	0,66	25,3	26,1	124,0	-3,7	-3,0
2,58	2,47	50,70	45,75	0,34	25,3	26,1	64,3	-3,5	-5,5
2,46	2,36	50,90	45,81	0,43	25,3	26,1	80,9	-3,5	-4,3

Tabela: II.18 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
31,18	29,31	50,53	50,78	3,70	25,5	26,2	697,1	2,2	0,3
29,92	28,12	49,84	59,63	3,67	25,5	26,3	692,4	81,4	11,8
28,17	26,48	50,62	68,87	3,76	25,6	26,3	709,4	142,8	20,1
26,82	25,21	49,89	77,39	3,87	25,6	26,4	729,8	204,8	28,1
24,75	23,26	49,98	86,13	3,72	25,7	26,4	701,0	248,5	35,4
23,35	21,95	49,58	91,46	3,52	25,7	26,5	664,2	271,6	40,9
21,69	20,39	50,17	99,78	3,61	25,8	26,5	681,0	298,9	43,9
20,44	19,22	49,91	102,46	3,54	25,8	26,6	666,7	298,4	44,8
18,50	17,39	49,40	107,72	3,33	25,9	26,6	627,6	299,7	47,7
15,36	14,44	49,86	113,41	3,16	25,9	26,7	596,6	271,2	45,5
13,76	12,93	49,45	113,17	2,96	26,0	26,7	557,7	243,5	43,7
13,35	12,55	50,30	106,89	2,81	26,0	26,7	530,2	209,8	39,6
12,39	11,65	51,03	106,56	2,64	26,0	26,7	496,9	191,2	38,5
11,21	10,54	51,16	108,82	2,77	26,0	26,8	521,3	179,6	34,4
9,83	9,24	49,81	109,52	2,63	26,1	26,8	495,9	163,0	32,9
9,66	9,08	49,85	109,44	2,43	26,1	26,8	457,2	160,0	35,0
7,93	7,45	50,08	109,45	2,47	26,1	26,8	466,0	130,7	28,1
6,59	6,19	49,95	104,90	2,53	26,1	26,8	476,3	100,5	21,1
5,56	5,22	50,71	79,02	1,33	26,1	26,9	250,0	43,7	17,5
4,20	3,95	52,45	68,01	1,19	26,2	26,9	224,4	18,1	8,1
3,94	3,70	52,30	54,82	0,50	26,1	26,8	94,0	2,8	2,9
2,66	2,50	51,91	45,81	0,70	26,1	26,8	132,8	-4,5	-3,4
2,06	1,93	52,17	45,80	0,24	26,1	26,8	46,0	-3,6	-7,9

Tabela: II.19 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=8\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
29,63	27,26	49,94	55,38	4,20	21,7	22,4	791,4	44,8	5,7
28,07	25,83	50,27	64,69	3,80	21,8	22,4	716,8	112,5	15,7
26,32	24,21	50,30	73,82	3,79	21,8	22,4	713,6	172,0	24,1
25,15	23,14	49,78	78,44	3,72	21,8	22,4	701,1	200,3	28,6
23,61	21,72	50,14	84,96	3,74	21,9	22,5	705,7	228,3	32,3
22,55	20,75	50,13	89,62	3,53	21,9	22,5	665,8	247,4	37,2
21,19	19,49	49,84	93,76	3,55	21,9	22,5	668,6	258,5	38,7
19,94	18,34	49,98	96,90	3,74	22,0	22,6	704,4	259,8	36,9
18,92	17,41	50,20	100,98	3,49	22,0	22,6	658,3	266,9	40,5
17,62	16,21	49,96	100,76	3,36	22,0	22,6	633,8	248,7	39,2
16,96	15,60	50,36	97,99	3,23	22,0	22,6	608,6	224,3	36,9
16,52	15,20	49,60	96,90	3,19	22,0	22,6	601,4	217,1	36,1
15,56	14,32	49,96	93,87	3,09	22,1	22,7	582,1	189,8	32,6
14,77	13,58	49,79	83,74	3,06	22,1	22,7	576,3	139,2	24,2
13,81	12,70	50,19	82,59	2,68	22,1	22,7	504,5	124,3	24,6
12,98	11,94	49,94	82,69	2,53	22,2	22,8	476,2	118,0	24,8
12,11	11,14	50,09	82,63	2,54	22,2	22,8	478,8	109,4	22,9
11,32	10,41	49,59	82,68	2,44	22,2	22,8	459,2	104,1	22,7
9,16	8,43	49,98	86,13	2,07	22,3	22,9	390,7	92,0	23,5
7,63	7,02	50,11	85,65	2,19	22,3	22,9	413,5	75,4	18,2
6,62	6,09	49,30	80,95	2,11	22,4	23,0	398,3	58,2	14,6
5,60	5,15	50,00	72,99	1,52	22,3	22,9	285,7	35,7	12,5
4,70	4,32	50,85	66,84	1,68	22,4	23,0	316,7	20,9	6,6
3,39	3,12	51,13	46,04	0,94	22,4	23,0	177,3	-4,8	-2,7
2,58	2,37	51,43	44,88	0,78	22,4	23,1	147,2	-4,7	-3,2
2,54	2,34	50,99	42,55	0,71	22,4	23,0	133,5	-6,0	-4,5

Tabela: II.20 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
28,50	25,65	49,67	50,33	3,12	24,1	24,7	588,0	5,2	0,9
27,57	24,82	50,23	59,73	3,16	24,1	24,8	595,4	72,8	12,2
26,99	24,29	49,65	64,28	3,18	24,2	24,8	599,3	109,7	18,3
25,40	22,86	49,67	73,37	3,33	24,2	24,8	627,0	167,2	26,7
23,84	21,46	50,22	82,42	3,38	24,3	24,9	636,5	213,2	33,5
22,14	19,92	49,99	86,97	3,06	24,4	25,0	576,2	227,4	39,5
20,16	18,14	49,92	90,09	3,03	24,5	25,1	571,7	224,9	39,3
18,87	16,99	49,81	87,48	2,87	24,5	25,1	541,2	197,5	36,5
17,26	15,54	48,93	81,54	2,56	24,6	25,2	482,8	156,4	32,4
15,63	14,07	49,83	79,84	2,40	24,6	25,2	452,1	130,3	28,8
13,94	12,55	50,14	79,87	2,17	24,7	25,3	408,9	115,2	28,2
11,71	10,54	50,28	80,34	2,00	24,7	25,3	376,1	97,8	26,0
9,73	8,75	50,13	82,05	1,98	24,8	25,4	373,2	86,2	23,1
8,01	7,20	49,79	81,79	1,70	24,8	25,4	320,8	71,2	22,2
6,49	5,84	47,98	72,74	1,54	24,8	25,4	289,7	44,6	15,4
5,64	5,08	47,60	68,98	1,63	24,8	25,4	306,6	33,5	10,9
2,45	2,20	49,72	42,83	0,67	24,8	25,5	125,4	-4,7	-3,7
2,06	1,85	49,91	41,38	0,35	24,8	25,5	66,2	-4,9	-7,4

Tabela: II.21 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 2400 rpm, $\lambda=2\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
42,63	41,78	49,70	69,48	7,83	15,9	16,5	1967,4	234,2	11,9
41,08	40,26	50,54	83,51	8,14	16,2	16,6	2045,9	376,3	18,4
38,76	37,98	51,44	105,57	7,98	16,2	16,7	2004,5	582,8	29,1
37,52	36,77	49,74	111,40	7,78	16,4	16,8	1955,1	642,6	32,9
35,59	34,88	50,84	127,20	7,86	16,4	16,9	1975,9	754,8	38,2
33,07	32,41	49,54	145,90	7,67	16,5	16,9	1927,7	885,3	45,9
30,37	29,76	49,69	160,89	7,73	16,5	17,2	1944,0	938,0	48,3
28,69	28,12	50,13	170,44	7,76	16,6	17,3	1950,8	958,7	49,1
26,77	26,23	49,67	178,75	7,44	16,7	17,3	1868,8	959,8	51,4
24,92	24,42	49,83	187,04	7,34	16,8	17,4	1844,5	949,8	51,5
22,80	22,35	50,16	195,84	6,98	16,8	17,4	1754,1	922,8	52,6
20,03	19,63	49,69	205,15	6,71	16,9	17,3	1685,4	864,8	51,3
16,90	16,56	50,59	218,57	6,46	16,9	17,3	1622,8	788,4	48,6
13,37	13,10	49,98	229,24	6,26	17,0	17,4	1574,5	665,5	42,3
7,75	7,60	50,08	221,62	5,39	17,1	17,5	1354,7	369,4	27,3
5,87	5,75	50,19	215,67	5,11	17,3	17,7	1283,2	269,6	21,0

Tabela: II.22 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 2400 rpm, $\lambda=4\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
42,56	40,86	49,98	70,02	7,27	19,2	19,5	1828,0	236,9	13,0
39,04	37,48	50,48	102,22	7,32	19,3	19,9	1839,0	561,1	30,5
36,12	34,68	50,97	123,54	7,09	19,5	19,9	1782,0	728,2	40,9
34,58	33,20	47,98	132,37	7,36	19,7	20,0	1848,8	810,7	43,8
31,96	30,68	49,53	151,60	7,34	19,8	20,1	1844,2	906,0	49,1
29,25	28,08	50,48	168,02	7,16	19,9	20,2	1799,2	954,8	53,1
24,46	23,48	50,56	185,78	6,81	20,1	20,4	1712,8	918,6	53,6
20,36	19,54	49,69	199,18	6,56	20,2	20,5	1647,7	845,4	51,3
17,89	17,17	49,77	198,64	6,08	20,3	20,5	1527,3	739,6	48,4
15,91	15,28	50,11	202,72	5,90	20,3	20,6	1481,7	674,5	45,5
13,15	12,62	49,87	202,86	5,61	20,4	20,6	1409,2	558,7	39,6
10,18	9,77	49,88	204,90	5,36	20,4	20,7	1347,8	438,3	32,5
7,40	7,10	49,92	207,45	5,19	20,5	20,8	1305,5	323,8	24,8
5,86	5,62	49,99	180,63	4,43	20,5	20,9	1114,2	212,5	19,1
4,95	4,75	49,62	158,75	3,73	20,5	20,9	936,6	150,1	16,0
4,92	4,72	49,71	158,80	3,84	20,5	20,9	964,3	149,1	15,5
3,61	3,47	49,97	91,23	2,06	20,6	20,9	516,7	41,4	8,0

Tabela: II.23 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 2400 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
40,62	38,18	50,20	65,01	7,31	18,6	19,0	1838,2	167,1	9,1
37,96	35,68	50,95	86,11	7,05	18,7	19,1	1772,6	370,8	20,9
35,42	33,30	49,85	102,62	7,37	18,8	19,2	1853,2	519,2	28,0
32,59	30,64	50,67	122,63	7,02	18,8	19,3	1764,7	651,5	36,9
29,95	28,15	49,88	137,38	7,07	18,9	19,3	1778,1	727,8	40,9
27,02	25,40	50,15	152,45	6,80	19,1	19,5	1709,8	767,9	44,9
23,71	22,29	50,04	161,65	6,59	19,1	19,5	1655,2	735,2	44,4
21,19	19,92	50,15	168,10	6,05	19,3	19,7	1519,8	694,3	45,7
14,50	13,63	50,09	180,87	5,42	19,6	20,1	1362,2	526,6	38,7
11,83	11,12	49,95	185,15	4,92	19,8	20,2	1235,7	444,3	36,0
10,40	9,77	49,91	182,83	4,88	20,7	21,2	1227,7	383,9	31,3
9,01	8,47	49,92	167,13	4,65	20,8	21,3	1168,4	293,2	25,1
8,00	7,52	49,73	159,96	4,53	20,8	21,4	1137,8	244,9	21,5
6,01	5,65	52,34	109,65	3,60	21,1	21,6	905,2	95,6	10,6
5,96	5,60	52,44	109,65	3,39	21,1	21,6	852,2	94,7	11,1
5,50	5,17	51,25	97,87	3,30	21,1	21,6	828,7	71,2	8,6
3,36	3,16	52,73	54,31	1,30	21,1	21,6	326,6	1,5	0,5

Tabela: II.24 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 2400 rpm, $\lambda=8\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
39,44	36,29	49,69	64,21	6,53	21,3	21,8	1641,2	159,1	9,7
36,78	33,84	49,76	87,95	6,55	21,4	21,9	1646,4	390,1	23,7
34,82	32,03	49,88	104,18	6,66	21,6	22,0	1673,7	525,2	31,4
32,45	29,85	50,37	118,88	6,44	21,7	22,2	1618,1	617,5	38,2
30,10	27,69	50,23	131,73	6,46	21,8	22,2	1623,8	681,4	42,0
27,32	25,13	50,57	143,56	6,16	21,9	22,3	1547,3	705,6	45,6
24,45	22,49	49,72	150,23	5,87	21,9	22,4	1474,8	682,5	46,3
22,15	20,38	49,79	155,77	5,87	22,0	22,4	1474,8	652,1	44,2
19,56	17,99	50,59	142,82	5,17	22,1	22,5	1298,8	501,1	38,6
18,22	16,76	50,09	140,62	4,92	22,1	22,6	1235,3	458,2	37,1
17,24	15,86	50,38	141,84	4,70	22,2	22,6	1182,5	437,9	37,0
15,22	14,00	50,28	144,72	4,41	22,2	22,7	1109,4	399,3	36,0
14,21	13,07	49,95	146,48	4,46	22,2	22,7	1120,8	381,1	34,0
13,03	11,99	50,30	149,53	4,42	22,2	22,7	1110,8	359,3	32,3
11,80	10,86	49,99	149,59	4,23	22,3	22,8	1062,5	326,4	30,7
9,98	9,19	50,54	127,11	3,82	22,3	22,8	959,9	212,4	22,1
8,60	7,91	50,54	122,11	3,56	22,4	22,9	895,9	170,9	19,1
8,30	7,64	51,02	120,82	3,49	22,4	22,9	876,2	161,0	18,4
4,74	4,36	51,71	56,53	1,35	22,5	22,9	339,6	6,3	1,9

Tabela: II.25 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 2400 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=50$ kPa

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
40,65	36,59	50,03	64,69	6,76	19,7	20,6	1699,7	165,6	9,7
37,31	33,58	50,24	83,40	6,80	19,9	20,8	1708,4	343,7	20,1
35,40	31,86	50,19	96,46	6,70	20,1	20,9	1682,8	454,9	27,0
33,40	30,06	49,71	109,90	6,73	20,2	21,0	1692,6	558,4	33,0
31,20	28,08	49,94	123,08	6,51	20,4	21,2	1635,7	633,9	38,8
28,69	25,82	49,93	133,05	6,47	20,5	21,4	1626,9	662,4	40,7
28,69	25,82	49,83	132,58	6,50	20,5	21,4	1632,4	659,5	40,4
26,97	24,27	49,78	140,43	6,33	20,6	21,5	1590,5	679,1	42,7
25,38	22,84	49,88	145,43	6,15	20,7	21,6	1544,6	673,5	43,6
23,16	20,84	49,77	145,01	5,94	20,8	21,7	1491,6	612,6	41,1
21,83	19,65	49,46	131,32	5,46	21,0	21,9	1373,3	496,4	36,1
20,66	18,60	49,45	127,36	5,20	21,1	22,0	1307,1	447,2	34,2
18,03	16,23	50,12	128,16	4,70	21,2	22,1	1180,5	390,9	33,1
17,14	15,43	49,52	129,57	4,54	21,3	22,2	1141,8	381,1	33,4
15,39	13,85	50,01	132,61	4,26	21,3	22,3	1071,8	353,1	32,9
13,62	12,25	50,23	135,37	4,25	21,4	22,3	1069,4	322,0	30,1
11,50	10,35	51,02	116,31	3,57	21,5	22,4	898,3	208,5	23,2
9,87	8,89	49,93	109,37	3,35	21,6	22,4	843,1	163,0	19,3
7,94	7,15	50,01	107,78	3,15	21,6	22,5	792,1	127,4	16,1

Tabela: II.26 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=100$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
32,41	30,47	101,81	103,18	4,15	21,5	22,2	782,9	12,4	1,6
27,76	26,09	100,15	129,97	4,57	21,5	22,3	861,2	229,9	26,7
24,20	22,74	99,84	143,68	3,20	21,6	22,4	603,7	294,7	48,8
24,17	22,72	100,13	144,27	4,14	21,6	22,4	781,2	296,3	37,9
19,42	18,25	99,52	160,57	3,50	21,7	22,5	659,6	329,3	49,9
16,67	15,67	100,31	166,83	3,00	21,8	22,6	566,0	307,9	54,4
13,71	12,88	100,03	171,37	3,63	21,9	22,7	685,1	271,6	39,6
11,16	10,49	99,74	173,22	3,36	22,0	22,8	633,6	227,8	35,9
10,08	9,47	99,91	173,97	3,39	22,1	22,9	639,4	207,3	32,4
8,97	8,43	99,61	173,93	2,53	22,3	23,1	477,5	185,2	38,8
8,77	8,24	100,10	173,99	3,40	22,2	22,9	640,6	180,0	28,1
8,25	7,76	99,69	174,03	2,63	22,4	23,1	495,9	170,4	34,4
7,42	6,97	100,61	153,78	3,03	22,2	23,0	571,9	109,6	19,2
6,33	5,95	99,53	147,12	1,97	22,5	23,2	371,6	83,7	22,5

Tabela: II.27 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=200$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
32,74	30,77	200,10	203,53	3,95	25,8	26,5	744,7	31,2	4,2
29,03	27,29	199,41	227,40	3,99	25,9	26,6	752,3	225,7	30,0
24,18	22,72	199,89	246,31	3,45	26,0	26,6	650,8	311,7	47,9
24,15	22,71	199,95	246,37	3,56	25,9	26,6	671,5	311,5	46,4
19,82	18,63	199,54	259,38	3,45	26,0	26,7	650,8	329,4	50,6
16,21	15,23	200,35	269,74	3,16	26,1	26,8	596,5	312,4	52,4
13,38	12,58	200,36	274,36	3,10	26,1	26,8	583,4	275,1	47,1
11,89	11,18	200,36	275,48	3,22	26,2	26,9	606,7	248,1	40,9
9,57	8,99	199,80	276,21	2,46	26,3	26,9	463,9	203,1	43,8
8,51	8,00	199,97	276,06	2,29	26,3	27,0	431,8	179,9	41,7
7,57	7,12	198,89	272,77	2,91	26,4	27,0	548,8	155,4	28,3
5,32	5,00	198,94	235,46	1,51	26,4	27,0	283,8	53,9	19,0

Tabela: II.28 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=100$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
30,59	27,53	99,91	101,93	3,53	24,1	24,8	665,8	17,1	2,6
27,48	24,73	100,27	124,80	3,28	24,2	24,9	617,5	187,2	30,3
22,82	20,54	100,30	142,60	3,59	24,4	25,1	677,6	268,1	39,6
19,41	17,47	100,39	150,67	3,33	24,5	25,2	627,2	271,0	43,2
18,32	16,49	99,73	150,90	3,00	24,7	25,5	566,4	260,4	46,0
16,45	14,80	99,72	137,00	2,88	24,8	25,5	543,4	170,3	31,3
14,10	12,69	99,41	133,65	1,98	25,0	25,7	373,3	134,1	35,9
12,51	11,26	100,07	134,36	2,16	25,0	25,7	408,0	119,2	29,2
10,33	9,30	100,27	135,21	2,24	25,1	25,8	422,1	100,3	23,8
7,22	6,50	100,08	132,95	1,31	25,2	25,9	247,1	65,9	26,7
5,94	5,34	99,62	125,81	0,99	25,2	25,9	187,4	43,2	23,0

Tabela: II.29 - Ensaio de desempenho, GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=200$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
27,25	24,52	199,94	226,44	3,39	26,5	27,1	639,9	200,6	31,3
22,83	20,55	200,18	246,09	3,17	26,5	27,2	597,0	291,2	48,8
18,55	16,70	199,99	255,38	3,37	26,6	27,2	635,0	285,4	44,9
16,99	15,29	199,67	258,78	3,09	26,6	27,2	582,7	279,0	47,9
16,62	14,96	199,63	256,30	2,81	26,6	27,3	530,1	261,6	49,4
16,22	14,60	200,42	243,98	2,64	26,6	27,3	497,9	196,3	39,4
13,69	12,32	200,64	237,62	2,09	26,6	27,3	393,1	140,6	35,8
11,67	10,51	199,12	236,38	1,69	26,6	27,1	319,1	120,8	37,9
8,70	7,83	200,40	237,81	2,07	26,6	26,9	390,2	90,4	23,2
8,74	7,87	200,32	237,89	2,18	26,6	26,8	410,8	91,3	22,2
6,77	6,09	200,02	233,82	1,26	26,6	27,2	236,9	63,5	26,8

Tabela: II.30 - Ensaio de desempenho, AGH, 1800 rpm, $\lambda=2\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
18,46	18,09	49,39	53,19	4,92	25,4	25,5	928,1	19,5	2,1
17,59	17,24	49,46	75,76	4,99	25,4	25,5	940,0	128,5	13,7
16,07	15,75	50,19	110,94	5,23	25,4	25,5	985,7	271,2	27,5
14,50	14,21	49,97	138,71	5,07	25,4	25,5	955,6	357,5	37,4
13,14	12,88	49,87	159,33	5,18	25,3	25,5	976,1	399,5	40,9
11,45	11,22	49,72	182,34	5,03	25,3	25,5	947,7	421,8	44,5
9,01	8,83	50,38	217,72	4,69	25,3	25,5	884,1	418,6	47,4
7,11	6,97	50,01	252,43	4,30	25,3	25,5	811,2	399,9	49,3
5,34	5,23	50,58	278,09	4,29	25,3	25,5	807,7	337,2	41,8
3,55	3,48	49,66	295,34	3,98	25,3	25,5	749,8	242,1	32,3

Tabela: II.31 - Ensaio de desempenho, AGH, 1800 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
15,54	14,61	49,73	49,79	3,73	25,5	25,6	702,2	0,2	0,0
14,56	13,69	50,10	77,99	3,98	25,5	25,6	750,8	112,8	15,0
13,76	12,93	49,96	89,13	3,93	25,5	25,6	740,7	149,7	20,2
12,39	11,65	50,26	109,86	4,20	25,5	25,6	790,9	205,1	25,9
11,54	10,85	50,07	123,96	3,83	25,5	25,6	722,6	236,8	32,8
9,88	9,29	50,30	149,41	4,22	25,4	25,4	795,2	272,0	34,2
8,09	7,61	49,60	186,98	4,34	25,4	25,6	817,8	308,8	37,8
6,60	6,20	49,24	214,46	4,21	25,4	25,6	794,3	302,7	38,1
4,30	4,04	50,05	251,40	4,15	25,4	25,6	782,6	240,3	30,7
3,54	3,33	49,65	253,78	3,82	25,4	25,6	719,6	200,8	27,9

Tabela: II.32 - Ensaio de desempenho, AGH, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
13,14	11,83	50,25	53,42	2,62	25,7	25,6	493,5	11,6	2,3
12,75	11,48	49,57	65,38	2,70	25,7	25,6	508,9	56,0	11,0
11,72	10,55	49,97	83,53	2,99	25,6	25,5	562,8	109,2	19,4
10,60	9,54	50,18	95,84	2,89	25,6	25,5	545,1	134,5	24,7
9,84	8,86	49,87	102,82	2,80	25,6	25,5	527,0	144,8	27,5
9,02	8,12	49,64	105,23	2,81	25,6	25,5	530,6	139,3	26,2
6,43	5,79	50,06	134,02	3,21	25,6	25,7	605,9	149,9	24,7
5,96	5,36	49,96	143,83	3,39	25,6	25,7	639,4	155,3	24,3
4,17	3,75	50,16	154,81	3,21	25,5	25,7	604,8	121,2	20,0

Tabela: II.33 - Ensaio de desempenho, AGH, 2400 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
20,68	19,44	49,45	51,85	6,94	22,6	22,8	1743,1	13,8	0,8
19,42	18,25	49,71	153,54	8,12	22,7	22,8	2041,2	560,0	27,4
18,53	17,42	50,57	167,13	7,96	22,7	22,9	2001,3	599,9	30,0
17,71	16,65	49,80	184,98	7,80	22,8	22,9	1960,4	665,1	33,9
16,25	15,28	49,54	209,95	7,85	22,8	23,0	1974,0	724,1	36,7
14,71	13,82	49,78	244,22	8,12	22,9	23,0	2041,0	794,4	38,9
13,43	12,62	49,39	273,19	8,12	22,9	23,1	2040,5	834,6	40,9
12,07	11,35	50,10	298,86	8,09	23,0	23,1	2032,2	834,1	41,0
10,53	9,90	49,98	330,33	7,97	23,1	23,2	2002,0	820,4	41,0
8,84	8,31	49,48	388,96	8,26	23,1	23,4	2076,2	833,5	40,1
7,05	6,62	49,07	419,18	8,12	23,2	23,4	2040,3	724,4	35,5
5,46	5,14	49,46	438,51	7,63	23,2	23,5	1916,5	590,5	30,8
3,61	3,40	49,45	445,04	6,80	23,3	23,7	1708,0	396,9	23,2
2,89	2,72	49,73	430,66	6,38	23,3	23,8	1602,7	306,2	19,1

Tabela: II.34 - Ensaio de desempenho, AGH, 2400 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
18,04	16,23	49,94	53,94	5,18	19,7	19,9	1302,0	20,0	1,5
17,22	15,50	50,28	79,11	7,05	19,8	20,0	1772,4	137,9	7,8
16,09	14,48	49,96	121,58	6,28	19,9	20,1	1579,5	320,1	20,3
15,09	13,58	50,14	140,07	6,27	20,0	20,2	1575,3	376,9	23,9
14,56	13,11	49,45	150,18	5,34	20,0	20,3	1341,4	407,5	30,4
13,27	11,94	50,07	172,38	6,60	20,1	20,4	1659,7	450,8	27,2
11,97	10,78	50,08	204,78	6,59	20,3	20,6	1657,1	514,6	31,1
11,25	10,12	49,65	226,18	7,41	20,4	20,7	1862,2	551,4	29,6
9,99	8,99	49,97	245,32	6,90	20,5	20,8	1733,4	542,3	31,3
8,82	7,94	49,62	288,49	6,44	20,6	20,9	1619,5	585,2	36,1
6,84	6,15	49,22	322,98	6,71	20,8	21,1	1687,6	520,0	30,8
5,22	4,70	50,29	316,42	6,42	21,2	21,5	1612,3	386,0	23,9
5,21	4,69	50,31	314,00	6,23	21,1	21,5	1566,4	381,3	24,3
3,50	3,15	49,99	256,30	5,75	21,3	21,7	1445,4	200,3	13,9

Tabela: II.35 - Ensaio de desempenho, AGH, 2400 rpm, $\lambda=20\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
17,30	13,84	49,96	56,53	4,77	25,0	25,2	1199,9	31,5	2,6
15,59	12,47	50,85	74,54	4,69	25,1	25,3	1177,9	102,6	8,7
14,06	11,25	50,68	75,45	4,38	25,2	25,4	1101,9	96,8	8,8
12,53	10,02	50,03	82,79	4,13	25,2	25,4	1038,9	114,0	11,0

Tabela: II.36 - Ensaio de desempenho, AGH, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=300$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
14,60	13,14	301,07	301,72	3,83	22,6	23,0	722,1	2,6	0,4
12,83	11,54	300,51	339,86	3,79	23,0	23,4	715,1	140,2	19,6
11,54	10,39	300,01	357,79	3,84	23,3	23,7	722,9	185,2	25,6
11,50	10,35	299,83	358,23	3,96	23,4	23,8	747,4	186,6	25,0
10,58	9,52	300,91	370,65	3,83	23,7	24,1	722,6	204,9	28,4
9,36	8,43	301,03	382,97	3,73	24,0	24,3	703,5	213,1	30,3
7,80	7,02	300,20	382,66	3,26	24,6	25,0	615,4	178,8	29,0
6,47	5,82	301,37	389,05	4,41	24,9	25,3	831,8	157,5	18,9
4,55	4,09	298,97	407,62	3,89	25,4	25,8	733,9	137,3	18,7
4,58	4,13	300,92	412,26	3,64	25,5	25,9	687,0	141,8	20,6

Tabela: II.37 - Ensaio de desempenho, AGH, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=200$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
13,97	12,58	200,39	203,11	3,03	26,6	26,9	571,9	10,6	1,8
12,75	11,48	200,61	232,94	2,89	26,9	27,2	544,4	114,5	21,0
11,36	10,22	201,00	256,39	2,75	27,2	27,5	518,1	174,7	33,7
10,47	9,42	200,92	266,72	3,25	27,4	27,6	612,4	191,4	31,2
10,44	9,40	201,05	266,48	2,93	27,4	27,7	552,9	189,8	34,3
9,40	8,46	199,45	271,81	2,77	27,7	27,9	522,6	188,9	36,1
7,87	7,08	200,06	271,43	2,90	27,8	28,2	546,2	156,0	28,6
6,35	5,72	199,38	278,92	2,99	28,1	28,5	562,7	140,3	24,9
4,58	4,12	200,46	291,50	2,98	28,6	29,0	561,8	115,9	20,6

Tabela: II.38 - Ensaio de desempenho, AGH, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=100$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
13,61	12,25	100,26	101,56	2,30	28,8	29,2	433,3	4,9	1,1
12,87	11,58	99,54	118,57	2,97	28,9	29,2	560,2	68,0	12,1
11,53	10,38	99,69	145,45	3,02	29,0	29,2	569,5	146,6	25,7
10,27	9,25	100,73	155,23	3,22	29,1	29,3	606,1	155,5	25,7
10,22	9,20	100,64	154,79	2,46	29,1	29,3	464,1	153,8	33,1
9,51	8,56	100,17	162,05	2,92	29,2	29,4	551,3	163,4	29,6
8,06	7,25	100,09	162,16	3,00	29,3	29,7	565,2	138,9	24,6
6,66	5,99	100,32	176,77	2,74	29,4	29,8	515,6	141,4	27,4
5,09	4,58	100,54	188,87	2,37	29,4	29,8	447,6	124,9	27,9

Tabela: II.39 - Ensaio de desempenho, AGH+GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	p_{gh} [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
28,91	27,18	49,65	62,35	425,72	5,17	28,6	29,2	974,2	102,0	10,5
27,54	25,88	50,77	71,39	362,40	5,54	28,7	29,3	1044,7	157,7	15,1
26,59	25,00	49,56	75,89	320,59	6,57	28,8	29,3	1238,6	194,5	15,7
25,63	24,09	49,79	81,42	278,43	7,04	28,8	29,3	1326,5	225,2	17,0
24,80	23,31	50,73	84,87	246,69	7,10	28,8	29,4	1337,9	235,2	17,6
23,28	21,88	50,44	91,69	191,06	7,63	28,8	29,4	1437,9	266,7	18,5
21,10	19,83	50,43	99,87	138,58	7,74	28,8	29,3	1459,2	289,8	19,9
19,44	18,28	49,49	105,84	100,48	7,29	28,8	29,3	1373,4	304,4	22,2
17,97	16,89	49,96	110,67	69,51	7,32	28,7	29,2	1380,1	303,0	22,0
14,92	14,02	50,37	115,18	53,71	6,60	28,6	29,1	1244,3	268,5	21,6
13,89	13,05	51,01	116,58	38,70	6,21	28,6	29,1	1171,4	252,9	21,6

Tabela: II.40 - Ensaio de desempenho, AGH+GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=50$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	p_{gh} [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
28,94	26,04	50,18	53,28	403,47	7,23	28,1	28,7	1362,4	24,9	1,8
27,51	24,76	50,58	65,41	342,90	5,86	28,2	28,8	1105,3	113,3	10,3
26,71	24,04	50,28	71,21	308,38	6,53	28,3	28,9	1231,5	155,3	12,6
25,35	22,82	49,96	75,78	258,46	6,56	28,4	29,0	1235,8	181,8	14,7
23,93	21,53	49,72	80,78	222,61	6,91	28,5	29,0	1302,0	206,4	15,9
22,39	20,15	50,25	88,89	189,04	6,60	28,5	29,1	1243,1	240,3	19,3
21,06	18,95	50,28	92,23	158,02	6,29	28,5	29,1	1186,4	245,4	20,7
19,56	17,60	50,28	95,42	132,18	6,28	28,5	29,0	1184,0	245,3	20,7
18,08	16,27	50,06	92,33	135,71	5,41	28,5	29,0	1020,5	212,2	20,8
17,33	15,60	50,06	84,98	120,39	5,14	28,5	29,0	969,4	168,1	17,3
16,33	14,70	49,42	82,92	101,79	4,81	28,4	28,9	907,5	152,0	16,8
15,63	14,07	51,25	84,79	89,63	5,38	28,4	28,9	1013,3	145,6	14,4
14,82	13,34	50,52	82,99	75,56	4,74	28,4	28,8	893,4	133,7	15,0
13,75	12,37	50,52	80,53	56,28	5,02	28,3	28,8	947,1	114,6	12,1
12,73	11,46	50,33	80,35	41,00	4,70	28,3	28,7	886,4	106,2	12,0

Tabela: II.41 - Ensaio de desempenho, AGH+GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=100$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	p_{gh} [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
27,58	25,92	100,65	125,08	418,68	6,81	28,7	29,3	1283,7	187,1	14,6
26,50	24,91	99,49	130,67	367,55	7,29	29,0	29,6	1374,2	229,5	16,7
25,49	23,96	99,74	136,35	325,57	7,76	29,3	29,8	1462,7	259,2	17,7
25,47	23,94	100,09	136,38	325,16	7,29	29,3	29,9	1374,4	256,7	18,7
24,30	22,84	100,92	142,59	280,65	8,20	29,6	30,1	1546,5	281,2	18,2
24,29	22,84	101,00	142,83	280,13	7,50	29,7	30,2	1413,1	282,3	20,0
23,27	21,88	101,24	146,28	243,55	7,49	29,9	30,4	1411,4	291,2	20,6
22,02	20,69	99,53	148,75	202,83	7,91	30,0	30,4	1491,5	301,0	20,2
20,51	19,28	99,92	154,53	173,70	7,85	30,0	30,5	1480,6	311,1	21,0
19,22	18,07	101,06	159,15	144,23	7,96	30,2	30,6	1499,7	310,1	20,7
18,07	16,98	100,29	159,94	118,23	7,24	30,3	30,7	1365,1	299,3	21,9
16,77	15,77	100,40	164,33	93,92	7,68	30,3	30,8	1447,4	297,9	20,6
14,49	13,62	100,75	169,00	83,46	7,19	30,4	30,8	1355,7	274,8	20,3
13,28	12,48	100,62	169,74	72,96	6,79	30,4	30,9	1279,0	254,9	19,9
12,25	11,51	100,08	169,47	61,99	6,77	30,4	30,9	1276,1	236,1	18,5
11,32	10,64	101,06	171,96	53,20	6,10	30,4	30,9	1150,7	222,9	19,4
10,37	9,74	100,59	172,09	44,67	6,12	30,5	30,9	1153,6	205,9	17,8

Tabela: II.42 - Ensaio de desempenho, AGH+GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=100$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	p_{gh} [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
28,60	25,74	99,72	111,27	446,22	6,08	28,3	28,9	1145,6	91,8	8,0
26,81	24,13	100,38	124,26	369,92	6,32	28,6	29,2	1191,7	177,8	14,9
25,73	23,16	99,94	128,41	327,99	6,40	28,7	29,3	1206,6	203,5	16,9
23,39	21,05	100,44	138,34	266,11	6,67	28,9	29,5	1257,5	246,2	19,6
22,13	19,91	99,78	142,40	228,92	6,76	29,0	29,6	1274,0	262,0	20,6
20,47	18,43	100,14	146,33	195,29	6,61	29,3	29,9	1246,8	262,7	21,1
18,15	16,34	100,26	150,66	166,14	6,15	29,6	30,1	1158,9	254,1	21,9
16,39	14,76	101,10	139,90	152,85	5,61	29,4	30,0	1056,6	176,7	16,7
15,65	14,08	101,68	138,61	139,91	5,83	29,7	30,2	1099,7	160,6	14,6
14,67	13,20	99,27	134,42	120,65	5,19	29,7	30,3	978,0	143,2	14,6
13,65	12,28	100,15	135,63	101,95	5,03	29,8	30,3	947,3	134,5	14,2
12,49	11,24	100,98	136,34	85,60	4,79	29,9	30,4	903,1	122,7	13,6
10,87	9,78	103,85	141,08	71,83	4,22	30,1	30,5	795,5	112,4	14,1

Tabela: II.43 - Ensaio de desempenho, AGH+GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=6\%$, $p_e=200$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	p_{gh} [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
26,07	24,51	200,17	237,03	442,75	6,45	26,3	27,1	1215,4	266,9	22,0
24,84	23,35	200,45	241,60	392,90	7,29	26,6	27,4	1374,0	283,9	20,7
23,64	22,23	199,86	246,38	346,90	7,33	26,9	27,7	1381,0	305,5	22,1
22,36	21,02	200,05	253,51	303,97	8,67	27,0	27,8	1633,5	332,0	20,3
20,54	19,31	199,83	257,25	265,42	8,24	27,2	27,9	1553,1	327,7	21,1
19,08	17,94	199,63	259,26	228,62	7,99	27,3	28,1	1506,3	316,1	21,0
17,61	16,55	199,95	262,89	194,67	7,72	27,4	28,2	1455,5	307,9	21,2
15,99	15,03	199,72	266,02	163,24	8,13	27,7	28,4	1532,6	294,5	19,2
12,01	11,28	200,24	272,41	139,30	6,53	27,8	28,5	1230,6	240,7	19,6
10,97	10,32	200,18	273,90	127,38	6,70	28,1	28,9	1263,4	224,7	17,8
9,71	9,13	199,55	274,60	114,64	4,77	28,3	28,9	898,2	202,4	22,5
8,82	8,29	200,34	277,33	110,54	7,52	28,5	29,2	1416,6	188,5	13,3

Tabela: II.44 - Ensaio de desempenho, AGH+GN 7000, 1800 rpm, $\lambda=10\%$, $p_e=200$ kPa.

q [m ³ /h]	q_L [m ³ /h]	p_e [kPa]	p_s [kPa]	p_{gh} [kPa]	T_{eixo} [N.m]	T_e [°C]	T_s [°C]	P_m [W]	P_h [W]	η [%]
26,34	23,70	200,80	230,84	443,67	6,62	25,1	25,9	1248,0	219,8	17,6
23,90	21,51	200,29	239,54	371,61	8,55	25,4	26,1	1612,5	260,6	16,2
22,53	20,28	200,82	245,68	331,33	6,55	25,5	26,2	1234,6	280,8	22,7
20,98	18,88	199,91	250,29	286,76	7,03	25,6	26,3	1324,5	293,6	22,2
17,30	15,57	200,34	258,53	255,30	5,93	25,8	26,5	1117,4	279,6	25,0
16,39	14,75	200,27	251,15	236,50	5,90	26,1	26,8	1111,7	231,6	20,8
15,91	14,32	199,81	250,46	227,89	5,82	25,9	26,7	1097,8	223,8	20,4
15,32	13,79	200,57	239,79	218,56	6,33	26,3	26,9	1193,3	166,9	14,0
14,65	13,19	201,91	240,43	207,55	5,42	26,4	27,1	1021,5	156,8	15,3
14,07	12,66	200,97	238,37	195,85	4,97	26,6	27,2	936,1	146,1	15,6
13,07	11,76	200,37	238,49	179,27	5,69	26,8	27,5	1072,0	138,4	12,9
12,40	11,16	200,34	238,47	167,89	5,85	26,9	27,6	1102,6	131,3	11,9
10,79	9,71	201,66	240,35	156,75	5,27	27,1	27,6	992,8	116,0	11,7
7,47	6,72	199,59	237,39	152,65	4,45	27,4	27,9	838,5	78,4	9,4

**ANEXO III - CURVAS DE CATÁLOGO DO DESEMPENHO DA
BCS GN 7000.**

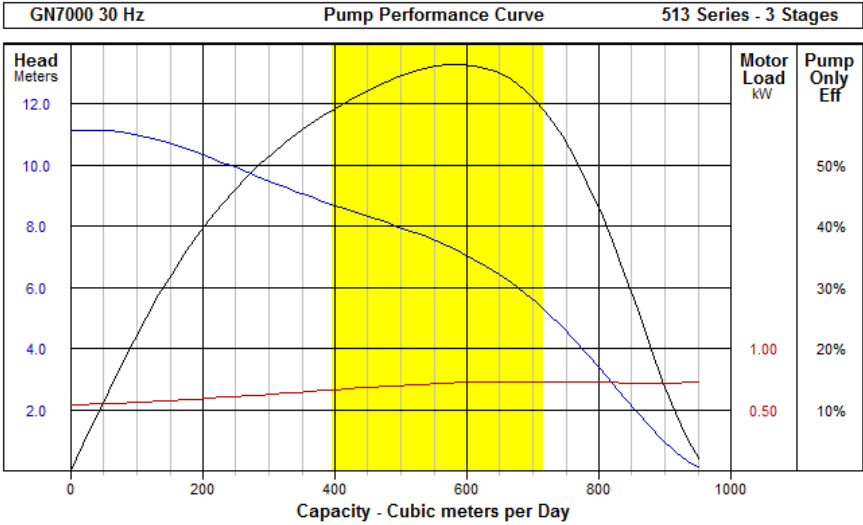


Figura: III.1 - Curvas de catálogo do desempenho da BCS REDA GN -7000, 3 estágios e frequência de 30 Hz.

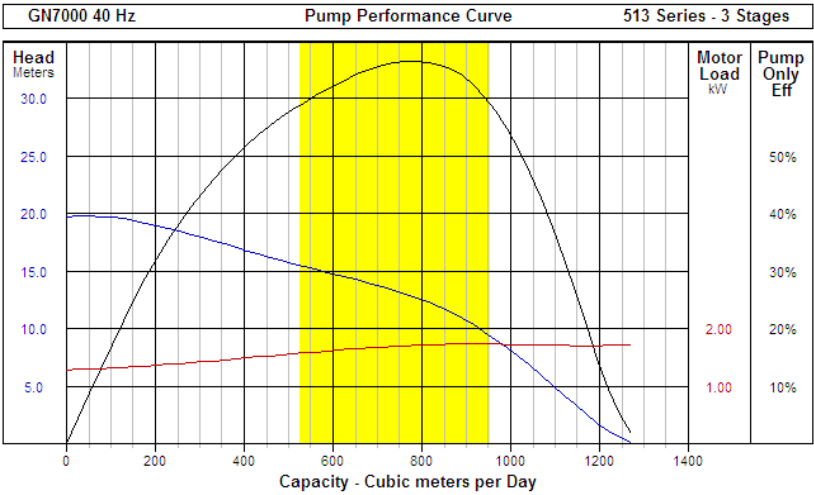


Figura: III.2 - Curvas de catálogo do desempenho da BCS REDA GN -7000, 3 estágios e frequência de 40 Hz.